

# Beherrschung von Unsicherheit in der Baureihenentwicklung

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Julian Lotz, M.Sc. aus Limburg a.d. Lahn

Tag der Einreichung: 31.07.2017, Tag der Prüfung: 15.11.2017

Darmstadt — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner

2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fachbereich Maschinenbau  
Fachgebiet für Produktentwicklung  
und Maschinenelemente *pmd*

Beherrschung von Unsicherheit in der Baureihenentwicklung  
Dissertation

Genehmigte Dissertation von Julian Lotz, M.Sc. aus Limburg a.d. Lahn

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Tag der Einreichung: 31.07.2017

Tag der Prüfung: 15.11.2017

Darmstadt — D 17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: [urn:nbn:de:tuda-tuprints-urn:nbn:de:tuda-tuprints-72824](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-urn:nbn:de:tuda-tuprints-72824)

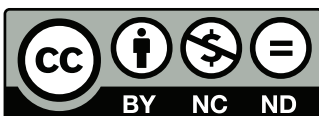
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/7282>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 International

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

---

# Erklärung zur Dissertation

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 7. März 2018

---

(Julian Lotz)

---

---

*„Die Erkenntnis der Notwendigkeit einer wissenschaftlichen Behandlung des Konstruierens ist zwar noch nicht überall vorhanden, sie bricht sich aber immer mehr Bahn. Hoffen wir, daß sich die Zahl der „Theoretiker“ des Konstruierens, auf welche die Industrie seit hundert Jahren vergeblich wartet, nunmehr rasch vergrößern wird und daß die von ihnen gewonnenen Ergebnisse bald selbstverständliche Grundlagen der Ingenieur-Ausbildung sein werden. Unser zielbewußtes Vorgehen auf allen anderen Gebieten der Technik gestattet es nicht länger, uns auf diesem Gebiete auch weiterhin der uns wesenfremden Führung durch den Zufall zu unterwerfen.“*

HUGO WÖGERBAUER, Begründer des methodischen Konstruierens

---



---

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen des Teilprojekts A7 „Skalierung unter Unsicherheit“. Dieses Teilprojekt war Bestandteil des Sonderforschungsbereichs (SFB) 805 „Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden System des Maschinenbaus“, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Danken möchte ich an dieser Stelle Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner für die Betreuung des Dissertationsvorhabens und die hilfreichen Anmerkungen, die dazu beigetragen haben, den Praxisbezug bei aller Theorie nicht gänzlich aus den Augen zu verlieren. Prof. Dr.-Ing Thomas Vietor danke ich herzlich für die Übernahme des Koreferats. Danken möchte ich auch Dr.-Ing. Hermann Klobardanz für die Möglichkeit, dieses Teilprojekt am pmd zu bearbeiten.

Außerdem möchte ich den Kollegen am pmd sowie im SFB 805 für die gute Zusammenarbeit danken, insbesondere natürlich Jan Würtenberger und Tillmann Freund, eine bessere Bürogemeinschaft hätte es gar nicht geben können.

Ein großes Dankeschön gilt zudem der Schenck RoTec GmbH, die im Rahmen eines gemeinsamen Projekts der hier entwickelten Methodik ihre erste Einsatzchance und damit eine erste Evaluation ermöglicht hat, hier möchte ich insbesondere Dr.-Ing. Christian Kaletsch und Gerald Schütz danken.

Ebenfalls möchte ich den HiWis, Studentinnen und Studenten danken, die mit ihrem Einsatz die Forschung im Teilprojekt A7 des SFB 805 unterstützt haben.

Natürlich gilt mein Dank auch allen anderen, die mich auf dem Weg bis zur Veröffentlichung dieser Dissertationsschrift begleitet und unterstützt haben.

Darmstadt, 26.02.2018

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ziel der Arbeit . . . . .	3
1.3	Effiziente Entwicklungsprozesse für Baureihen . . . . .	3
1.4	Einordnung . . . . .	4
1.5	Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>6</b>
2.1	Modelle der Produktentwicklung . . . . .	6
2.1.1	Produktmodelle . . . . .	6
2.1.2	Vorgehensmodelle . . . . .	7
2.1.3	Produktlebenslauf . . . . .	12
2.1.4	Prozesse und Prozessmodelle . . . . .	13
2.2	Modellwissenschaft und Ähnlichkeit . . . . .	15
2.2.1	Das Konzept der Ähnlichkeit . . . . .	15
2.2.2	Dimensionshomogenität und Pi-Theorem . . . . .	17
2.2.3	Physikalische Ähnlichkeit . . . . .	19
2.2.4	Skalierung von Modellen . . . . .	21
2.2.5	Grundlagen der Baureihenentwicklung . . . . .	23
2.2.6	Ähnlichkeit, Skalierung und Modelltheorie in anderen Disziplinen . . . . .	28
2.3	Unsicherheit in lasttragenden Systemen . . . . .	30
2.3.1	Der Unsicherheitsbegriff . . . . .	30
2.3.2	Klassifizierung von Unsicherheit . . . . .	31
2.4	Robust Design . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Das Konzept der Skalierungsunsicherheit</b>	<b>40</b>
3.1	Manifestation von Skalierungsunsicherheit . . . . .	40
3.2	Der Zusammenhang zwischen der Skalierung technischer Systeme und Prozessen . . . . .	45
3.3	Skalierung unter Unsicherheit . . . . .	47
3.4	Skalierung von Unsicherheit . . . . .	50
3.5	Das Skalierungsunsicherheitsmodell . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Forschungsbedarf und Zielsetzung</b>	<b>53</b>
4.1	Analyse der klassischen Baureihenentwicklung . . . . .	53
4.2	Herausforderungen bei der Entwicklung komplexer Baureihen . . . . .	59
4.3	Potenziale der Baureihenentwicklung, Ziel dieser Arbeit . . . . .	60
4.4	Forschungsfragen und –ansatz . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Eine erweiterte Methodik zur Baureihenentwicklung</b>	<b>66</b>
5.1	Einführungsbeispiel zur Antizipation maßstabsabhängigen Verhaltens in der Entwicklung einer Baureihe . . . . .	66
5.2	Grundelemente des angepassten Vorgehensmodells zur Baureihenentwicklung . . . . .	69
5.3	Frontloading unterstützendes Vorgehen in der Baureihenentwicklung . . . . .	72

5.4	Analyse und Synthese in der Baureihenentwicklung . . . . .	73
5.4.1	Grundlagen methodischen Vorgehens in der Baureihenentwicklung . . . . .	73
5.4.2	Analyse- und Synthesetätigkeiten in der Baureihenentwicklung . . . . .	75
5.5	Ein Vorgehensmodell zur Entwicklung skalierbarer Produkte . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Produktmodelle in der Baureihenentwicklung</b>	<b>85</b>
6.1	Verwendung von Modellen in der Baureihenentwicklung . . . . .	87
6.2	Die Skalierung integrierende Modellwelt . . . . .	91
6.2.1	Einführung . . . . .	91
6.2.2	Erstellen der SiM . . . . .	94
6.3	Ein Prozessmodell für die Baureihenentwicklung . . . . .	97
6.3.1	Aufbau des Prozessmodells für Prozesse in der nBRE . . . . .	98
6.3.2	Arbeiten mit dem Prozessmodell für Prozesse in der nBRE . . . . .	101
6.4	Abbildung von größenabhängigen Eigenschaften und Relationen . . . . .	103
6.5	Multiple-Domain-Matrix für die Baureihenentwicklung . . . . .	107
<b>7</b>	<b>Methoden und Vorgehensmodelle für Teilprobleme der Baureihenentwicklung</b>	<b>118</b>
7.1	Problemlöseprozesse in der Baureihenentwicklung . . . . .	118
7.2	UMEA - Uncertainty Mode and Effects Analysis in der Baureihenentwicklung . . .	120
7.2.1	BRE-UMEA zur Beherrschung von Skalierungsunsicherheit in Produkt und Prozess . . . . .	120
7.2.2	SMU-UMEA zur Beherrschung von Skalierungsmodellunsicherheit in der Entwicklung . . . . .	121
7.3	Analyse maßstabsabhängigen Verhaltens technischer Systeme . . . . .	123
7.3.1	Methoden zur Analyse größenabhängiger Varianz . . . . .	124
7.3.2	Identifikation skalierungskritischer Eigenschaften und von Skalierungsgrenzen	125
7.4	Synthese skalierungsrobuster Lösungen . . . . .	128
7.4.1	Synthesestrategien bei unvollständiger Ähnlichkeit . . . . .	128
7.4.2	Absicherung durch Referenzprodukte . . . . .	133
<b>8</b>	<b>Evaluation</b>	<b>139</b>
8.1	Anwendung auf ein Hochdrehzahlgetriebe . . . . .	139
8.1.1	Aufbau des Hochdrehzahlgetriebes . . . . .	139
8.1.2	Warum eine konventionelle Baureihenentwicklung nicht möglich ist . . . . .	140
8.1.3	Vorgehen . . . . .	142
8.1.4	Analyse der Skalierungsgrenzen . . . . .	145
8.1.5	Identifizieren von Schwerpunkten der Synthese . . . . .	147
8.1.6	Ergebnisse . . . . .	147
8.1.7	Referenz: Entwurf eines Experten . . . . .	154
8.2	Kritische Würdigung . . . . .	156
8.2.1	Qualitative Beurteilung des Nutzens der Methodik . . . . .	156
8.2.2	Quantifizierte Beurteilung des Nutzens der Methodik mittels eines KPI . .	159
<b>9</b>	<b>Fazit</b>	<b>162</b>
9.1	Ergebnisse . . . . .	162
9.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf . . . . .	163

---

Anhang	165
A Bestimmen der Exponenten einer dimensionslosen Gleichung	165
B Skalierung eines Querpressverbandes	167
C Formeln zur Getriebeberechnung	168
C.1 Lagerverlustleistung . . . . .	168
C.2 Verzahnungsverluste . . . . .	170
C.3 Wärmeübertragung durch die Getriebewand . . . . .	171
D Auswahl potenziell skalierungskritischer Effekte	173
E Beispiel für die Auswirkung einer Störgröße auf eine Skalierung	179
Literatur	180

---

## Abbildungsverzeichnis

---

1.1	Beispiele für Baureihen . . . . .	2
2.1	Beitrag verschiedener Themengebiete zum Gegenstand dieser Arbeit. . . . .	6
2.2	Vorgehen nach VDI 2221. . . . .	9
2.3	Das Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung. . . . .	11
2.4	Die vier Domänen des Axiomatic Design. . . . .	12
2.5	Das erweiterte Prozessmodell nach HEIDEMANN . . . . .	14
2.6	Beispiel geometrischer Ähnlichkeit: Dreiecke. . . . .	16
2.7	Skalierung mittels Dimensionsanalyse . . . . .	22
2.8	Vorgehen in der PPCEM nach SIMPSON ET AL. . . . .	27
2.9	Hierarchie verschiedener Skalen . . . . .	30
2.10	Aleatorische und epistemische Unsicherheit . . . . .	32
2.11	Zusammenhang zwischen Informationsmenge und Unsicherheit . . . . .	33
2.12	Unsicherheit in der Produktentwicklung . . . . .	35
2.13	Auf der Mengenlehre basiertes Unsicherheitsmodell für Modellunsicherheit. . . . .	36
2.14	Modell zur Kategorisierung von Unsicherheit . . . . .	37
2.15	Quality Loss Function nach TAGUCHI ET AL. . . . .	38
2.16	Robustheit am Beispiel zweier Federkennlinien . . . . .	39
3.1	Getriebestufe als Beispiel für verschiedene bei der Skalierung auftretende Effekte. . . . .	41
3.2	Eigengewichtseinfluss bei der Skalierung einer Struktur . . . . .	42
3.3	Verhalten eines Querpressverbandes bei der Skalierung . . . . .	45
3.4	Addition von Skalierungsunsicherheit verschiedener Ursachen . . . . .	49
3.5	Maßstabsabhängige Varianz in der Baureihenentwicklung. . . . .	50
3.6	Das Skalierungsunsicherheitsmodell . . . . .	52
4.1	Klassisches Vorgehen in der Baureihenentwicklung und Analyse der Tätigkeiten. . . . .	54
4.2	Produktmodellkonkretisierung in der Baureihenentwicklung . . . . .	56
4.3	Die Zehnerregel der Fehlerbehebungskosten . . . . .	57
4.4	Unsicherheitsverkettung in der klassischen Baureihenentwicklung. . . . .	58
4.5	Bearbeitungsaufwand in der Produktentwicklung . . . . .	61
4.6	Möglichkeit zur Beeinflussung von Produkteigenschaften . . . . .	62
4.7	Ausrichtung der Baureihenentwicklung am Verhalten. . . . .	62
4.8	Kosteneinsparpotenzial einer neuen Methodik zur Baureihenentwicklung . . . . .	64
5.1	Wachstumsgesetze für Getriebeverluste und Kühlung des Getriebes . . . . .	68
5.2	Elemente des angepassten Vorgehensmodells . . . . .	71
5.3	Frontloading betonendes Vorgehen in der Baureihenentwicklung . . . . .	73
5.4	Verschiedene Vorgehensstrategien in der Baureihenentwicklung . . . . .	74
5.5	Analyse und Synthese in der nBRE. . . . .	76
5.6	Analyse und Synthese im CPM/PDD-Modell. . . . .	77
5.7	Gültigkeit verschiedener Modelle im Skalierungsbereich einer Baureihe . . . . .	78
5.8	Vorgehensmodell der nBRE . . . . .	80
5.9	Gestaltvarianten einer Parallelführung unter Skalierungsunsicherheit. . . . .	84
6.1	Grundlagen der integrierten Produktstrukturmodellierung für Baureihen. . . . .	85
6.2	Modellzyklus zur Arbeit mit der Skalierung integrierenden Modellwelt. . . . .	88
6.3	Generieren maßstabs-bereichsweise gültiger Skalierungsmodelle . . . . .	90
6.4	Maßstabs-bereichsweise gültige Skalierungsmodelle bei Prozessvarianten . . . . .	90

6.5	Die Skalierung integrierende Modellwelt . . . . .	91
6.6	Abhängigkeiten der Modelle von Produkt, Prozess und Skalierung . . . . .	93
6.7	Beispiel zum Aufbau einer SiM . . . . .	96
6.8	SiM mit mehreren Skalierungsbereichen . . . . .	98
6.9	SiM für eine Brücke . . . . .	99
6.10	Prozessmodell zur Analyse größenabhängiger Einflüsse. . . . .	100
6.11	Ausschnitt aus dem Störgrößenportfolio. . . . .	101
6.12	Multiple Domain Matrix für die Baureihenentwicklung. . . . .	109
7.1	Münchner Vorgehensmodell für die Baureihenentwicklung . . . . .	119
7.2	Parallele Nutzung der Methoden der Baureihenentwicklung und der UMEA im Analyse-Synthese-Zyklus der Produktentwicklung. Zu beachten sind auch die durch flächige Pfeile im Hintergrund dargestellten Informationsflüsse, Informationen aus Produkt und Prozess helfen, die Skalierungsunsicherheit zu reduzieren. . . . .	121
7.3	Subvorgehensmodell zur UMEA in der Baureihenentwicklung . . . . .	123
7.4	Integration von Information über Varianz in Skalierungsmodelle . . . . .	125
7.5	Relationskategorien für Wachstum beschreibende Relationen . . . . .	127
7.6	Prinzipien des Robust Design zur Beherrschung von Unsicherheit . . . . .	129
7.7	Abkanten eines Blechs . . . . .	129
7.8	Konzeptvarianten der Abkantbank und Interaktion mit dem Abkantprozess . . . .	130
7.9	Wachstumsgesetze für eine Abkantbank mit verringertem Unsicherheitseinfluss . .	131
7.10	Kompensation unterschiedlicher Wachstumsexponenten durch Gestaltung . . . . .	133
7.11	Vorgehen bei der Synthese komplexer Produkte. . . . .	134
7.12	Informationsübertragung von Referenzprodukten auf zu entwickelnde Produkte . .	135
8.1	Der Schleuderstand und das Getriebe. . . . .	139
8.2	Diagramm zentraler Eigenschaften der HDG-Baureihe . . . . .	140
8.3	Prinzipiskizze des Hochdrehzahlgetriebes. . . . .	141
8.4	Baustruktur des Hochdrehzahlgetriebes. . . . .	144
8.5	Skalierungspotenziale des HDG. . . . .	146
8.6	Unterschiedliche Gestaltungsvarianten der Spindellagerung. . . . .	148
8.7	Auswirkung eines Wechsels des Lagerwerkstoffs . . . . .	150
8.8	Beanspruchungsveränderung durch die Skalierung des HDG . . . . .	151
8.9	Gestaltungsvarianten der Planetenlagerung. . . . .	152
8.10	Vergleichskonzept zur Evaluation des skalierten HDG. . . . .	155
E.1	Distanzmessung via Laser . . . . .	179

---

## Tabellenverzeichnis

---

2.1	Interne und externe Unsicherheit in Prozessen . . . . .	15
2.2	Internationales Einheitensystem . . . . .	18
2.3	Dimensionsanalyse für einen Biegebalken . . . . .	22
2.4	Wirkungs- und Informationskategorien von Unsicherheit. . . . .	34
6.1	Mögliche Datentypen der Inhalte der bMDM. . . . .	116
7.1	Unsicherheitsreduktion durch Verwendung eines Referenzprodukts . . . . .	138
8.1	Änderungen am Grundentwurf bei Einsatz verschiedener Skalierungsmethodiken .	157
8.2	Daten zur Berechnung des RI . . . . .	161
A.1	Konkreter Entwurf des Biegebalkens und ermittelte Durchbiegung. . . . .	165
B.1	Daten für den Grundentwurf des Querpressverbandes . . . . .	167
C.1	Eigenschaften des Grundentwurfs des einstufigen Stirnradgetriebes . . . . .	168
D.1	Potenziell kritische Skalierungseffekte . . . . .	174

---

## Abkürzungen

---

An	Anforderungen
AZ	Anfangszustand
Bt	Bauteile
bMDM	baureihenspezifische Multi Domain Matrix
BPM	Business Process Management
BRE	Baureihenentwicklung
BRE-UMEA	Baureihenentwicklungs-UMEA
CPM	Characteristics-Properties Modelling
DoE	Design of Experiments
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
EZ	Endzustand
Ge	Gestalt
GL	Gleitlager
GPPE	Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung
Gz	Gestaltungszone
HDG	Hochdrehzahlgetriebe
kBRE	klassische Baureihenentwicklung
LCF	Low Cycle Fatigue
MDM	Multi Domain Matrix
MKM	Münchener Produktkonkretisierungsmodell
MVM	Münchener Vorgehensmodell
nBRE	Neue Baureihenentwicklung
oBRE	optimierungsbasierte Baureihenentwicklung
PDD	Property-Driven Development
pE	physikalische Effekte
PEP	Produktentwicklungsprozess
PPCEM	Product Plattform Concept Exploration Method
Pr	Prozess
QPV	Querpressverband
RD	Robust Design
RWDR	Radial-Wellendichtring
SFB	Sonderforschungsbereich
SiM	Skalierung integrierende Modellwelt
SMART	Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing
SMU-UMEA	Skalierungsmodellunsicherheits-UMEA
SR	Sonnenrad



TOTE	Test Operate Test Exit
UMEA	Uncertainty Mode and Effects Analysis
VRM	Variation Risk Management
VMEA	Variance Mode and Effects Analysis
VMF	Variation Management Framework
WDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
WG	Wachstumsgesetz(e)
ZF	Zugehörigkeitsfunktion

---

## Symbole

---

Zeichen	Einheit	Bezeichnung	Gleichung/S.
$a_{ij}$	versch.	Einträge der Wachstumsgesetzmatrix $\mathbf{A}_{WG}$	(6.18)
$a \ b \ c$	m	Seitenlängen	(2.1), (2.2)
$g$	$\text{m/s}^2$	Erdbeschleunigung	S. 96
$h$	m	Höhe (Abmessung)	S. 96
$h_0$	m	Höhe einer Tellerfeder	S. 39
$i \ j \ k$	-	Nummernindizes	
$i \ j \ k$	-	Nummernindizes	
$k$	-	Skalierungsfaktor für Kosten	(2.18)
$l$	m	Länge	(2.11)
$m$	-	Anzahl der Elemente in einem Satz dimensionsloser Kennzahlen	S. 20
$m$	versch.	Zielwert einer Produkteigenschaft	(2.18)
$m$	-	Modul eines Zahnrades	(8.2)
$n$	-	Anzahl pyhsikalischer Größen	(2.9), (2.10)
$p$	versch.	Wert einer Eigenschaft	(6.6)-(6.13)
$\tilde{p}$	versch.	mit Unsicherheit behafteter Wert einer Eigenschaft	(6.6)-(6.13)
$p, p_H$	$\text{N/m}^2$	Pressung, HERTZ'sche Pressung	(8.5), S. 150
$q_i$	-	Exponenten dimensionsloser Kennzahlen	(2.12), (2.13), (A.1)
$r$	-	Anzahl pyhsikalischer Basisgrößen	(2.10)
$r$	m	Radius	
$s$	m	eingefederter Weg	S. 39
$\vec{s}$	-	Mit Unsicherheit behafteter Szenariovektor der Eigenschaften	(6.18), (6.20)
$t$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur in Grad Celsius.	
$t$	s	Zeit	S. 73
$w$	m	Absenkung	

Zeichen	Einheit	Bezeichnung	Gleichung/S.
$x_i y_i$	versch.	physikalische Größe in einem Einheitenmaßstab mit absolutem Nullpunkt	(2.4)-(2.8)
$x_i' y_i'$	versch.	physikalische Größe in einem Einheitenmaßstab mit nicht absolutem Nullpunkt	(2.4)-(2.8)
$x_i$	versch.	abgeleitete physikalische Größe	(2.4)-(2.8)
$y$	versch.	tatsächlicher Wert einer Produkteigenschaft	(2.18)
$A$	$m^2$	Flächeninhalt	
$A_{WG}$	-	Wachstumsgesetzmatrix	(6.19)
$A_0$	Geldeinheit	Zugeordnete Kosten	(2.19)
$Bi$	-	BIOT'sche Kennzahl	
$C_j$	-	dimensionsloser Koeffizient	(2.6)
$Ca$	-	CAUCHY'sche Kennzahl	
$E$	$N/m^2$	Elastizitätsmodul	
$E_{mech}$	W, Nm, N	Mechanische Energie	S. 96
$\vec{E}_i$	versch.	Eigenschaftsvektor	(3.13)
$\vec{E}_i'$	versch.	Unsicherheit behafteter Eigenschaftsvektor	(3.12), (3.13)
$F$	N	Kraft	
$F_C$	N	kritische Last	S. 39
$Fo$	-	FOURIER'sche Kennzahl	
$Ho$	-	HOOKE'sche Kennzahl	
$Gr$	-	GRASHOF-Zahl	
$I$	$mm^4$	Flächenträgheitsmoment	
$K_V$	-	Oberflächeneinflussfaktor	
$L$	Geldeinheit	Qualitätskosten	
$M$	Nm	Drehmoment	
$M_j$	-	Skalierungsfaktoren	(6.12)
$\tilde{M}_j$	-	Mit Unsicherheit behaftete Skalierungsfaktoren	(6.12)
$Ne$	-	NEWTON'sche Kennzahl	
$Ne$	-	NUSSELT-Zahl	
$P$	-	Wahrscheinlichkeit	S. 32
$P_{V,i}$	W	Verlustleistung von Komponenten/Effekt $i$	
$Pr$	-	PRANDTL-Zahl	
$\dot{Q}_{ab}$	W	Abgeführter Wärmestrom	
$R$	$N/m^2$	Zugfestigkeit	
$R$	-	Relationen	(6.23), (6.24)
$Re$	-	REYNOLDS'sche Kennzahl	
$S$	-	Satz dimensionsloser Kenngrößen	S. 20

Zeichen	Einheit	Bezeichnung	Gleichung/S.
$S$	-	Sicherheitsfaktor	
$T$	K	Temperatur in Kelvin.	
$U$	versch.	Unsicherheit	
$Z$	-	Wert der KPI-Zielfunktion	(8.10)
$\alpha$	-	Formzahl	S. 32
$\alpha$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient	S. 32
$\alpha$	°	Winkel	S. 96
$\gamma_{ji}$	versch.	Exponent einer physikalischen Basisgröße	
$\delta_i$	versch.	Nullpunkt eines Einheitenmaßstabs	(2.4)
$\lambda_i$	-	Skalierungsfaktor eines Einheitenmaßstabs	(2.4)
$\lambda_S$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	spezifische Wärmeleitfähigkeit	(2.4)
$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	kinematische Viskosität	
$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Dichte	
$\varphi_B$	-	relative Stoffwechselrate	(2.17)
$\varphi_F$	-	Stufensprung der Kraft	
$\varphi_L$	-	Stufensprung der charakteristischen Länge	(2.2)
$\varphi_{\Delta L}$	-	Stufensprung der charakteristischen Varianz der Gestalt	(3.11)
$\varphi_{L,cr}$	-	kritischer geometrischer Skalierungsfaktor	41
$\varphi_W$	-	Stufensprung der Körpermasse	(2.17)
$\varphi_x$	-	Stufensprung der Größe x	(2.15)
$\omega$	1/s	Winkelgeschwindigkeit	
$\Delta_0$	versch.	Abweichung von einem Mittelwert einer Produkteigenschaft, die zur Funktionsuntüchtigkeit führt	(2.19)
$\Delta_i$	versch.	Abweichung von einem Mittelwert einer Produkteigenschaft	(3.13)
$\Delta U$	versch.	Relative bekannte Modellunsicherheit im Vergleich zweier Modelle	(3.13)
$\Theta$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Massenträgheitsmoment	
$\Pi_i \Pi_i$	-	dimensionslose Kennzahl	
$\varnothing$	m	Durchmesser	S. 157

---

## 1 Einleitung

---

In der Einleitung sollen die Motivation zur Baureihenentwicklung (BRE) als solcher, das Ziel der Arbeit, die Einordnung in die Forschung zur Baureihenentwicklung sowie zum Thema Unsicherheit (SFB 805) und ein Überblick über den Aufbau der Arbeit gegeben werden.

---

### 1.1 Motivation

---

Ein am Markt erfolgreiches Produkt zu entwickeln stellt eine Reihe verschiedener Anforderungen an den Prozess, der die Produktidee in eine Produktdokumentation im Sinne vollständiger Fertigungsunterlagen überführen soll. Dieser Prozess, allgemein als *Produktentwicklungsprozess* (PE-Prozess, PEP) bekannt, gliedert sich in verschiedene Phasen, die in der Praxis teils sequenziell, teils iterativ und teilweise auch parallel durchlaufen werden. Diese Phasen, in denen z. B. Anforderungen ermittelt, Konzepte erarbeitet und bewertet werden, oder auch Lösungen konkretisiert und ausgearbeitet werden, unterliegen alle den angesprochenen Anforderungen an den PE-Prozess in seiner Gesamtheit: Sie sollen die bestmögliche Lösung für ein Problem bei gleichzeitig möglichst geringem Aufwand liefern. „Bestmöglich“ ist hier im Sinne einer Deckungsgleichheit von Produkteigenschaften und Kundenanforderungen zu verstehen.<sup>1</sup> In diesem Fall wird gemäß TAGUCHI die höchstmögliche Qualität erreicht. Der geringstmögliche Aufwand wiederum bezieht sich sowohl auf die Tätigkeit des Produktentwicklers, als auch auf die zur Herstellung des Produktes notwendigen Fertigungsprozesse. Beide Arten von Aufwand können über Kosten quantitativ erfasst werden.

An dieser Stelle wird ein Zielkonflikt deutlich - je mehr Aufwand in der Entwicklung und der Fertigung betrieben wird, desto präziser werden sich die (möglicherweise gar nicht so deterministischen) Kundenanforderungen erfüllen lassen. Allerdings schiebt die üblicherweise ebenfalls artikulierte Forderung des Kunden nach möglichst geringen Kosten, zusammen mit der Notwendigkeit Gewinne zu erzielen, dem ausufernden Entwicklungs- und Fertigungsperfektionismus mit Zielkostenvorgaben einen Riegel vor. Will das Unternehmen dennoch eine größtmögliche Qualität zu einem vom Kunden akzeptierten und wirtschaftlich tragbaren Preis erzielen, kann es unter anderem im Rahmen der Produktentwicklung Methoden zur Rationalisierung des Entwicklungsprozesses einsetzen.

Oft treten Kundenanforderungen auf, die sich auf eine quantitativ unterschiedliche Ausprägung derselben Produktmerkmale beziehen, beispielsweise bei

- *Maschinenelementen* (unterschiedliche Abmessungen ansonsten gleicher Produkte, bspw. bei Schrauben, Muttern, Passfedern, Kupplungen...),
- *Konsumgütern* (Kochgeschirr unterschiedlichen Volumens, Bildschirme unterschiedlicher Größe...), aber auch
- *Investitionsgütern* (Drehmaschinen unterschiedlicher Spitzenweite und Länge, Fertigungsbau-Lagerhallen unterschiedlicher Größe, Prüf- und Messmaschinen).

Hier liegt es zur Begrenzung des Entwicklungsaufwandes nahe, für ansonsten gleiche Produkte nicht für jede Größe neue Lösungen zu suchen, sondern bereits erarbeitete Lösungen mehrfach zu nutzen. Dazu wird ein Vorgehen benötigt, das eine Übertragung von existierenden Lösungen auf andere Werte derselben Merkmale<sup>2</sup> der betroffenen Produkteigenschaften erlaubt. Dieses Vorgehen stellt die Modelltheorie mit ihren verschiedenen Skalierungsmethoden zur Verfügung, vgl. Abschnitt

---

<sup>1</sup> Vgl. TAGUCHI ET AL. 2005, S. 171.

<sup>2</sup> Merkmal und Wert zusammen stellen eine Eigenschaft, z. B. eines Produkts, dar, vgl. BIRKHOFFER 1980, S. 6.

2.2. Ausgehend von meist wenig individualisierten Produktmodellen werden ein oder mehrere Skalierungsmodelle abgeleitet, welche die Berechnung sogenannter Folgeentwürfe ausgehend vom bereits existierenden Grundentwurf erlauben. Dabei wird auf Ähnlichkeitsbeziehungen zurückgegriffen; ggf. werden Wachstumsgesetze abgeleitet. Durch das Beibehalten gleicher Lösungen können auch Fertigungsprozesse und Materialien trotz der Skalierung unverändert bleiben. Ergebnis eines solchen Vorgehens ist eine *Baureihe*.



Abbildung 1.1: Beispiele für Baureihen: Schrauben und Radial-Rillenkugellager.

Die Entwicklung von Baureihen auf Basis der Modelltheorie bietet verschiedene Vorteile:

- der Entwicklungsaufwand für gleiche Produkte unterschiedlicher Größe kann durch die Nutzung von Ähnlichkeitsbeziehungen deutlich reduziert werden<sup>3</sup>
- die Verwendung gleicher Lösungen für gleiche Funktionen, die Verwendung möglichst gleicher Materialien und Fertigungsprozesse, führt, wie bei Baukastensystemen, zu einer reduzierten internen Komplexität<sup>4</sup>
- das Reduzieren der Komplexität bringt durch reduzierte Einlernzeiten Kosten- und Qualitätsvorteile in der Fertigung mit sich<sup>5</sup>
- für den Kunden können mit geringem Aufwand passende Skalierungsstufen des Produkts bereitgestellt werden, bei gegenüber einer Einzelanfertigung höheren Qualität
- Standardisierungspotenziale können genutzt werden (Normzahlreihen)<sup>6</sup>
- mit denselben Methoden können Versuchsergebnisse vom Modellmaßstab auf den Produktmaßstab umgerechnet werden, auch ohne Kenntnis axiomatischer Modelle des zu beschreibenden Sachverhalts<sup>7</sup>

<sup>3</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 820.

<sup>4</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 840.

<sup>5</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 840 und KLOBERDANZ 1991, S. 7 f.

<sup>6</sup> Vgl. PAHL und BEITZ 1974a, S. 71.

<sup>7</sup> Vgl. BRIDGMAN 1963, S. 81.

---

## 1.2 Ziel der Arbeit

---

Das Ziel der Arbeit ist es, die aus den 1970er und 1980er Jahren stammende Methodik zur Baureihenentwicklung nach PAHL & BEITZ dahingehend zu überarbeiten, dass die Erkenntnisse, welche die Produktentwicklungsforschung in der Zwischenzeit gewonnen hat, auch in der Baureihenentwicklung zur Anwendung kommen können. Moderne Methoden zur prozessorientierten Produktentwicklung (*Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung* (GPPE)<sup>8</sup>), zur Analyse und Beherrschung von Unsicherheit als Mittel zur Sicherstellung der Produktqualität, zum Komplexitätsmanagement und der zielgerichteten Entwicklung von Produkten und Prozessen können im Zusammenspiel mit den bereits in der Baureihenentwicklung verankerten Nutzung von Methoden der Modellwissenschaft (*Ähnlichkeits- und Wachstumsgesetze*) eine neue Qualität der Baureihenentwicklung eröffnen. Ziel hierbei ist die Reduktion des Gesamtentwicklungsaufwandes bei komplexen skalierten Produkten, die Sicherstellung der Produktqualität und die Reduktion von Fehlern. Diese drei Ziele gehen im Kontext der Baureihenentwicklung Hand in Hand, wie in den Kapiteln 4 und 5 hergeleitet wird.

---

## 1.3 Effiziente Entwicklungsprozesse für Baureihen

---

Ein zentraler Punkt der Baureihenentwicklung ist die Rationalisierung von Entwicklungsprozess und Fertigung, wie in Abschnitt 1.1 beschrieben. Daraus folgt, dass Ergänzungen oder Anpassungen an der Methodik zur Baureihenentwicklung nach PAHL & BEITZ einen Beitrag zur Rationalisierung des Entwicklungsprozesses leisten müssen. Hierbei ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden:

- Bei Beibehaltung vollständiger Ähnlichkeit ist eine Skalierung direkt anhand passender *Ähnlichkeitskennzahlen* (z. B. *Re*, *Ho*, etc.) möglich und zulässig. Diese Art der Skalierung setzt keine Kenntnis konkreter axiomatischer oder empirischer Produktmodelle voraus<sup>9</sup>, das Skalierungsmodell ist durch die Ähnlichkeitskennzahl direkt vorgegeben. Die mathematische Durchführung der Skalierung ist einfach. Für diese Fälle der Baureihenentwicklung lässt sich folglich keine Verbesserung hinsichtlich eines rationaleren Entwicklungsprozesses erzielen, im Gegenteil, zusätzlicher Aufwand wird das Ergebnis nicht verbessern. Das Beibehalten vollständiger Ähnlichkeit ist jedoch ein Ausnahmefall in der Baureiheneinentwicklung.<sup>10</sup>
- Kann keine vollständige Ähnlichkeit bei der Skalierung beibehalten werden, wird der Entwicklungsprozess schwieriger: Halbähnlichkeit macht verschiedene Anpassungen am Produkt nötig, die auf Basis von bekannten Produktmodellen die Ableitung von Wachstumsgesetzen erlauben. Nach diesen kann anstelle der Ähnlichkeitskennzahlen skaliert werden. Wachstumsgesetze sind aufgrund ihrer einfachen Struktur und des teils approximativen Charakters selten exakt. Durch Unstetigkeiten (z. B. durch diskret gestufte Nachbarsysteme/Komponenten, physikalische Effekte wie der Umschlag von laminarer in turbulente Strömung) wird der Entwickler meist zu Iterationen in späten Phasen der Baureihenentwicklung, bspw. der Auslegung, gezwungen. Hier bietet sich ein Potenzial zur Reduktion des Entwicklungsaufwandes und zur Steigerung der Qualität, indem die Zahl der notwendigen Iterationen reduziert wird, während gleichzeitig die Produktqualität gegenüber dem konventionellen Entwicklungsprozess gleich bleibt oder gesteigert wird.

---

<sup>8</sup> Vgl. ABELE ET AL. 2005, S. 5.

<sup>9</sup> Die relevanten Einflüsse auf die Zielgrößen müssen jedoch bekannt sein; weiterhin ist im Fall vollkommen unbekannter Relationen die physikalische Ähnlichkeit bei der Skalierung zu wahren, detailliert wird hierauf in Abschnitt 2.2 Bezug genommen.

<sup>10</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 820 f.

---

Diese Arbeit befasst sich insbesondere mit dem zweiten Fall der Baureihenentwicklung: Kennzeichnend ist für die Systeme, bei denen vollständige Ähnlichkeit nicht beibehalten werden kann, dass sie eine höhere Komplexität aufweisen als vollständig ähnliche Produkte. Dies kommt aufgrund verschiedener verwendeter physikalischer Effekte, übergeordneter Anforderungen etc., vgl. Kapitel 4, zustande. Die Komplexität ist gekennzeichnet durch eine große Anzahl an Relationen zwischen den Elementen im System, sowie im Kontext der Skalierung, des Grades der Abweichung vom Verhalten eines bei vollständiger Ähnlichkeit skalierten Systems.

Aktuell existierende Entwicklungsmethodiken zur Baureihenentwicklung nutzen entweder keine Strategien zur Komplexitätsbeherrschung (PAHL & BEITZ<sup>11</sup>) oder nutzen durch die Ausrichtung auf mathematische Optimierungsmethoden nicht die Potenziale der Modellwissenschaft zur einfachen Skalierung von Systemen (z.B. SIMPSON ET AL.<sup>12</sup>, MALAKOV ET AL.<sup>13</sup>).

Es ist anzunehmen, dass durch die Nutzung der Ähnlichkeit als Komplexität reduzierender Methode, vgl. BRIDGEMAN<sup>14</sup>, zusammen mit zeitgemäßen Ansätzen der Produktentwicklungsforschung eine neue Methodik zur Baureihenentwicklung entwickelt werden kann, die näher am minimalen Entwicklungsaufwand bei gleichbleibender oder höherer Qualität liegt als existierende Ansätze.

---

## 1.4 Einordnung

---

Diese Arbeit entstand im Kontext des Teilprojekts „Skalierung unter Unsicherheit“ im Sonderforschungsbereich 805 an der TU Darmstadt, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Dieses Teilprojekt befasste sich mit zwei unterschiedlichen Anwendungsbereichen der Modelltheorie: zum einen die Nutzung der Modellwissenschaft zur allgemeinen Skalierung von Modellen und Eigenschaften. Dieser Teil der Arbeit wurde am Fachgebiet Fluidsystemtechnik (FST) bearbeitet. Zum anderen, und darauf fußt die vorliegende Arbeit, wurde die Nutzung der Modelltheorie zur Reduktion von Unsicherheit, vgl. Abschnitt 2.3, in der Baureihenentwicklung am Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) untersucht. Neben der Beschreibung von größenabhängiger Unsicherheit durch entsprechende Wachstumsgesetze umfasste dieser Bereich des Teilprojekts auch das Erarbeiten eines Vorgehensmodells, welches die Berücksichtigung von Unsicherheit im Entwicklungsprozess für Baureihen erlaubt. Ferner steht diese Arbeit in der Reihe der Arbeiten zur Baureihenentwicklung am Fachgebiet pmd (vormals *Maschinenelemente und Konstruktion*, MuK). Durch die Entwicklung der Baureihenmethodik durch PAHL, MOST und RIEG, sowie das Update zur Nutzung der Methodik in der Rechnerunterstützten Konstruktion (durch KLOBERDANZ)<sup>15</sup> bot das Forschungsprojekt „Skalierung unter Unsicherheit“ eine Gelegenheit, die Methodik zur Baureihenentwicklung abermals auf den Stand der Produktentwicklungsforschung zu bringen und dabei den Fokus anzupassen.

---

## 1.5 Aufbau der Arbeit

---

Die Arbeit gliedert sich in acht Abschnitte, die aufeinander aufbauen. Zunächst wird der Stand der Forschung für die relevanten Themenbereiche aufgearbeitet; die zentralen Themen sind die Modelle und das Vorgehen in der Produktentwicklung, vgl. Abschnitt 2.1, und speziell in der

---

<sup>11</sup> PAHL und BEITZ 1974a und PAHL und BEITZ 1974b

<sup>12</sup> SIMPSON ET AL. 2001.

<sup>13</sup> MALAKOV ET AL. 2015.

<sup>14</sup> BRIDGMAN 1963.

<sup>15</sup> Vgl. PAHL und BEITZ 1974a, PAHL und BEITZ 1974b, PAHL und RIEG 1984, MOST 1989 und KLOBERDANZ 1991



---

Baureihenentwicklung, vgl. Unterabschnitt 2.2.5, die Modellwissenschaft im Sinne der Skalierung von technischen Systemen, vgl. Abschnitt 2.2, die Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen, vgl. Abschnitt 2.3, sowie das Robust Design, vgl. Abschnitt 2.4. Aus dem Stand der Forschung wird das Konzept der Skalierungsunsicherheit abgeleitet, vgl. Kapitel 3, aus welchem sich der Forschungsbedarf in Kapitel 4 ergibt. Dieser führt im selben Kapitel auf die Zielsetzung dieser Arbeit. Aus der Zielsetzung heraus werden die Herausforderungen und Potentiale der Arbeit bestimmt, vgl. Abschnitte 4.1 und 4.3, und es ergeben sich die Forschungsfragen, vgl. Abschnitt 4.4. In Kapitel 5 wird ein Vorgehen zur Entwicklung von Baureihen unter Unsicherheit entwickelt, hierfür werden sowohl Modelle, vgl. Kapitel 6, als auch Methoden, vgl. Kapitel 7, vorgestellt. Dieser Teil der Arbeit gliedert sich insbesondere in die Analyse größenabhängiger Unsicherheit sowie die Synthese skalierungsrobuster Lösungen. Auf die verwendeten Modelle und Methoden folgt die Evaluation der Methodik am Beispiel eines Hochdrehzahlgetriebes in Abschnitt 8.1. In diesem Kapitel wird außerdem ein Vergleich zwischen konventioneller Baureihenentwicklungsmethodik und der neuen Baureihenentwicklungsmethodik angestellt um den Nutzen der neuen Methodik quantifizieren zu können, vgl. Abschnitt 8.2. Abschließend werden das Ergebnis dieser Arbeit mit dem Fazit, vgl. Abschnitt 9.1 zusammengefasst und ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben, vgl. Abschnitt 9.2.



---

## 2 Stand der Forschung

---

Im Stand der Forschung werden die Grundlagen zur Baureihenentwicklung unter Unsicherheit aufgearbeitet. Dies geschieht aufgrund des breiten Querschnitts der relevanten Themen in knapper Form; viele der verwendeten Modelle, Vorgehensmodelle und Begriffe sind in der Literatur umfassend behandelt, Hinweise auf Literaturstellen mit extensiverer Erläuterung der einzelnen Betrachtungsgegenstände sind in den jeweiligen Unterkapiteln aufgeführt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da es sich bei dieser Arbeit um eine Konsolidierung der Baureihenentwicklung mit einigen wichtigen Erkenntnissen der Konstruktionsforschung der letzten etwa zwanzig Jahre handelt. Zum Gebrauch dieser Arbeit sind keine über einen Überblick hinausgehenden Kenntnisse der jeweiligen Teilgebiete notwendig. Zur weiteren Forschung oder intensiven Beschäftigung mit der übergeordneten Thematik ist ein vertieftes Studium der Literatur wiederum unabkömmlich, hier helfen die Literaturempfehlungen. Die in dieser Arbeit aufgegriffenen Themengebiete sind in Abbildung 2.1 zusammengestellt.<sup>16</sup>

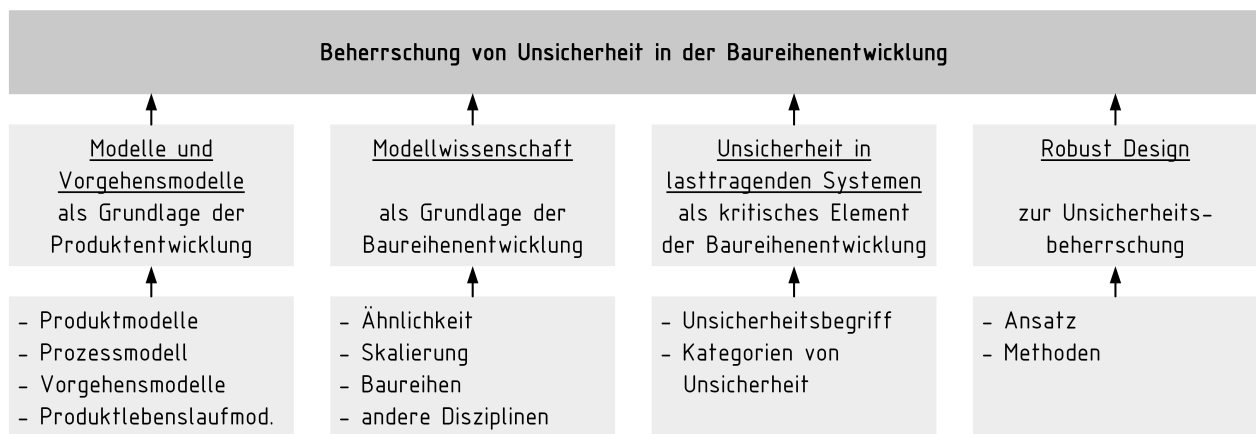


Abbildung 2.1: Beitrag verschiedener Themengebiete zum Gegenstand dieser Arbeit.

---

### 2.1 Modelle der Produktentwicklung

---

Die Modelle der Produktentwicklung bilden die Basis für die Entwicklung eines Vorgehens und von Methoden, die dann im Entwicklungsprozess angewandt werden können. Für diese Arbeit sind insbesondere Vorgehensmodelle als übergeordnete Struktur eines Entwicklungsprozesses, Modelle zur Beschreibung des Produktlebenslaufs, Prozessmodelle sowie Metamodelle zur Kategorisierung von Produktmodellen selbst relevant. Produktlebenslauf und Prozessmodelle sind insbesondere unter dem Aspekt der Unsicherheitsbeherrschung notwendig.

---

#### 2.1.1 Produktmodelle

---

Produktmodelle sind nach PAHL & BEITZ auf die relevanten Informationen vereinfachte Abbilder eines Produktes; sie stellen ein Objekt oder einen Zusammenhang abstrahiert dar und ermöglichen so die Analyse eines technischen Systems.<sup>17</sup> Dabei spricht STACHOWIAK auch von den Merkmalen,

<sup>16</sup> Hinweis: In der Arbeit wird sowohl von Modellwissenschaft als auch Modelltheorie gesprochen – die Modellwissenschaft bezeichnet die wissenschaftliche Arbeit mit Modellen, bspw. im Rahmen der Skalierung von Systemen, die Modelltheorie ist die abstrakt-theoretische Beschäftigung mit Modellen als Abbildern der Realität. Diese beiden – in ihren jeweiligen Disziplinen etablierten – Begriffe sind also nicht Synonym zu verwenden.

<sup>17</sup> Vgl. PAHL ET AL. 2007, S. 86, HUBKA und EDER 1988, S. 66, HERTZ 1894, S. 1 f. und andere.

---

die jedes Modell aufweist: *Abstraktion*, *Verkürzung* und *Pragmatismus* (siehe auch Abschnitt 6.2).<sup>18</sup> WÄLDELE spricht zudem davon, dass das Produkt auf einer definierten abstrakten Ebene und ohne Zeitbezug repräsentiert wird.<sup>19</sup>

Zum Vorgehen bei der Erstellung und Verwendung wird auf die Literatur<sup>20</sup> bzw. Abbildung 6.2 verwiesen.

Modelle dienen in der Produktentwicklung, abgeleitet vom *Characteristics-Properties-Modelling-Ansatz* (CPM)<sup>21</sup>, vor allem zwei verschiedenen Zwecken, vgl. Abschnitt 5.4: Analyse des Produktverhaltens sowie zweckmäßige Wahl unabhängiger Eigenschaften.

### Produktmodellkonkretisierung

Produktmodelle werden über den Entwicklungsprozess immer weiter konkretisiert. Eine Darstellung dieser zunehmenden Konkretisierung geben zunächst ANDREASEN und HEIN, und später EHRENSPIEL mit pyramidenförmigen Modellen der *Produktkonkretisierung*.<sup>22</sup> Diese wurde von SAUER um die Modellierung von Prozessen erweitert.<sup>23</sup> Die auf Baureihen adaptierte Pyramiden-darstellung der Produktmodellkonkretisierung ist in Abschnitt 4.1 hergeleitet und in Abbildung 4.2 dargestellt.

Ähnlich, jedoch mit verringertem Informationsgehalt über das Fortschreiten im *Produktentwicklungsprozess* (PEP) ist die Produktmodellkonkretisierung auch von PONN ET AL. im *Münchner Produktkonkretisierungsmodell* (MKM) dargestellt.<sup>24</sup> Die Kategorien der MKM sind kompatibel zum Aufbau der Modellwelt in Abschnitt 6.2)

---

#### 2.1.2 Vorgehensmodelle

---

Vorgehensmodelle im Sinne der Produktentwicklung sind nach EHRENSPIEL „Hilfsmittel zur Lösung von Problemen bzw. zur Bewältigung von Aufgaben“.<sup>25</sup> Sie erfüllen den Zweck der Komplexitätsbewältigung im Entwicklungsprozess. Große Probleme werden systematisch in handhabbare Teilprobleme zerlegt und gelöst, initial ist dies die Entwicklungsaufgabe.<sup>26</sup> Die modellhafte Wiedergabe des Entwicklungsprozesses dient als Hilfsmittel zur Planung, Orientierung und Reflexion des durchzuführenden Entwicklungsprozesses.<sup>27</sup> Um dies umzusetzen, wurden im Laufe der Zeit verschiedene Strategien entwickelt; im Folgenden werden kurz die Historie und einige für diese Arbeit relevanten Vorgehensmodelle vorgestellt.

Baureihenspezifisch werden zwei weitere Vorgehensmodelle vorgestellt. Zum einen das bereits angesprochene Vorgehensmodell zur Baureihenentwicklung nach PAHL & BEITZ, siehe Abbildung 4.1. Dieses Vorgehensmodell ist das einzige rein auf Baureihenentwicklung abgestimmte Vorgehensmodell der Literatur und dient aufgrund seiner Konzentration auf die Baureihenentwicklung als Referenzmodell für die Evaluation (Vergleich der Entwicklungsergebnisse und Bildung von KPIs zur Bewertung der neuen Methodik, vgl. Abschnitt 8.2). Es wird detailliert in Abschnitt 4.1 analysiert und besprochen.

---

<sup>18</sup> Vgl. STACHOWIAK 1973, S. 131 ff.

<sup>19</sup> Vgl. WÄLDELE 2012, S. 28.

<sup>20</sup> Vgl. PAGE und KREUTZER 2005, S. 199 und OBERKAMPF ET AL. 2002, S. 335.

<sup>21</sup> Vgl. WEBER 2012.

<sup>22</sup> Vgl. ANDREASEN und HEIN 1987, S. 184. und EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 39

<sup>23</sup> Vgl. SAUER 2006, S. 68.

<sup>24</sup> Vgl. LINDEMANN 2009, S. 45.

<sup>25</sup> Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 103.

<sup>26</sup> Ebenda.

<sup>27</sup> Vgl. LINDEMANN 2009, S. 33.

## Historie der Vorgehensmodelle

Produktentwicklungsprozesse sind strukturierte Vorgehen, die alle zur Erstellung einer vollständigen Produktmodellierung notwendigen Arbeitsschritte umfassen.<sup>28</sup>

Die Entwicklung von Vorgehensmodellen zur Beschreibung des PEP wird im Jahre 1875 von REULEAUX begründet.<sup>29</sup> Er beschreibt ein Vorgehen zur kinematischen Synthese, dies ist die erste Beschreibung *systematischer Konstruktion*. Im Laufe der Zeit fand ein Paradigmenwechsel statt, weg von dem Konstruieren als Kunst und hin zu einer erlernbaren, diskursiven Tätigkeit.<sup>30</sup> Später wurde das Gebiet stärker erforscht; 1943 stellt WÖGERBAUER einen systematischen strukturierten Prozess dar, der die Bedeutung der Aufgabenstellung und das Generieren von Lösungsalternativen betont.<sup>31</sup> Die bis heute gebräuchlichen Prozessschritte in Entwicklungsprozessen werden 1955 von HANSEN in seinem Grundsystem mit vier Entwicklungsstufen beschrieben.<sup>32</sup> Frühere Entwicklungsmodelle sind sehr an Entwicklungsphasen orientiert. Sie betrachten in der Hauptsache das Produkt, jedoch kaum äußere Einflüsse. Die starke Phasenorientierung findet sich auch im Softwareengineering, z.B. im Waterfall-Modell von ROYCE<sup>33</sup> oder im Stage-Gate-Prozess von COOPER<sup>34</sup>, welcher ab den 1970er Jahren im angloamerikanischen Sprachraum sehr beliebt war<sup>35</sup>. Die Grundlagen der heute im deutschen Sprachraum vorherrschenden Methodiken und Vorgehensmodelle wurden ebenfalls in den 1970er Jahren von RODENACKER, ROTHETAL, HUBKA, KOLLER, PAHL und BEITZ erarbeitet und in der VDI-Richtlinie 2221 zusammengetragen.<sup>36</sup>

## Aktuelle Vorgehensmodelle

Es gibt inzwischen eine ganze Reihe von mehr oder weniger spezialisierten Vorgehensmodellen. Einige für diese Arbeit bedeutsame Vorgehensmodelle werden in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt. Neben den angesprochenen Vorgehensmodellen gibt es noch eine Vielzahl weiterer teils allgemeiner, teils sehr spezifischer Vorgehensmodelle.

VDI 2221-2225: Ein wichtiges Merkmal der VDI-Richtlinien 2221-2225 ist die Betonung des iterativen Charakters der Produktentwicklung; so sieht das Vorgehensmodell der VDI 2221 Iterationsschleifen in allen Phasen der Produktentwicklung vor, vgl. Abbildung 2.2. Weiterhin ist das Vorgehen insbesondere durch die bereits in den Richtlinien 2222-2225 enthaltenen Methoden praxisnah gehalten. Für diese Arbeit sind neben dem Vorgehensmodell der VDI 2221 insbesondere die Richtlinien VDI 2222, das methodische entwickeln von Lösungsprinzipien, sowie 2223, das methodische Entwerfen technischer Produkte, relevant.

Die VDI 2221 und die mit ihr verwandten Modelle schlagen ein stark diskursives Vorgehen vor. Um aus dem diskursiven Vorgehen einen Nutzen i.S. von Produktinnovation zu erzielen, ist es nach BIRKHOFER notwendig, die Vorgehensmodelle situativ anzupassen, um zu vermeiden, dass dem Entwickler ein unpassendes, behinderndes Vorgehen aufoktroiert wird.<sup>37</sup> Für die Anpassung der Produktmodelle entsprechend der Situation ist es notwendig, dass der Anwender den theoretischen Hintergrund des verwendeten Modells kennt und versteht. Dies verhindert die Wahrnehmung von

<sup>28</sup> Vgl. PAHL ET AL. 2007, S. 11 f.

<sup>29</sup> Vgl. REULEAUX 1875, S. 44 ff.

<sup>30</sup> Vgl. BENDER 2004, S. 12 ff.

<sup>31</sup> Vgl. WÖGERBAUER 1943, S. 86 ff.

<sup>32</sup> Vgl. HANSEN 1955, S. 17.

<sup>33</sup> Vgl. ROYCE 1970, S. 329, 338.

<sup>34</sup> Vgl. COOPER 1990, S. 46.

<sup>35</sup> Vgl. UNGER und EPPINGER 2011, S. 690.

<sup>36</sup> Vgl. FELDHOUSEN und GROTE 2013a, S. 16.

<sup>37</sup> Vgl. BIRKHOFER ET AL. 2002, S. 32.

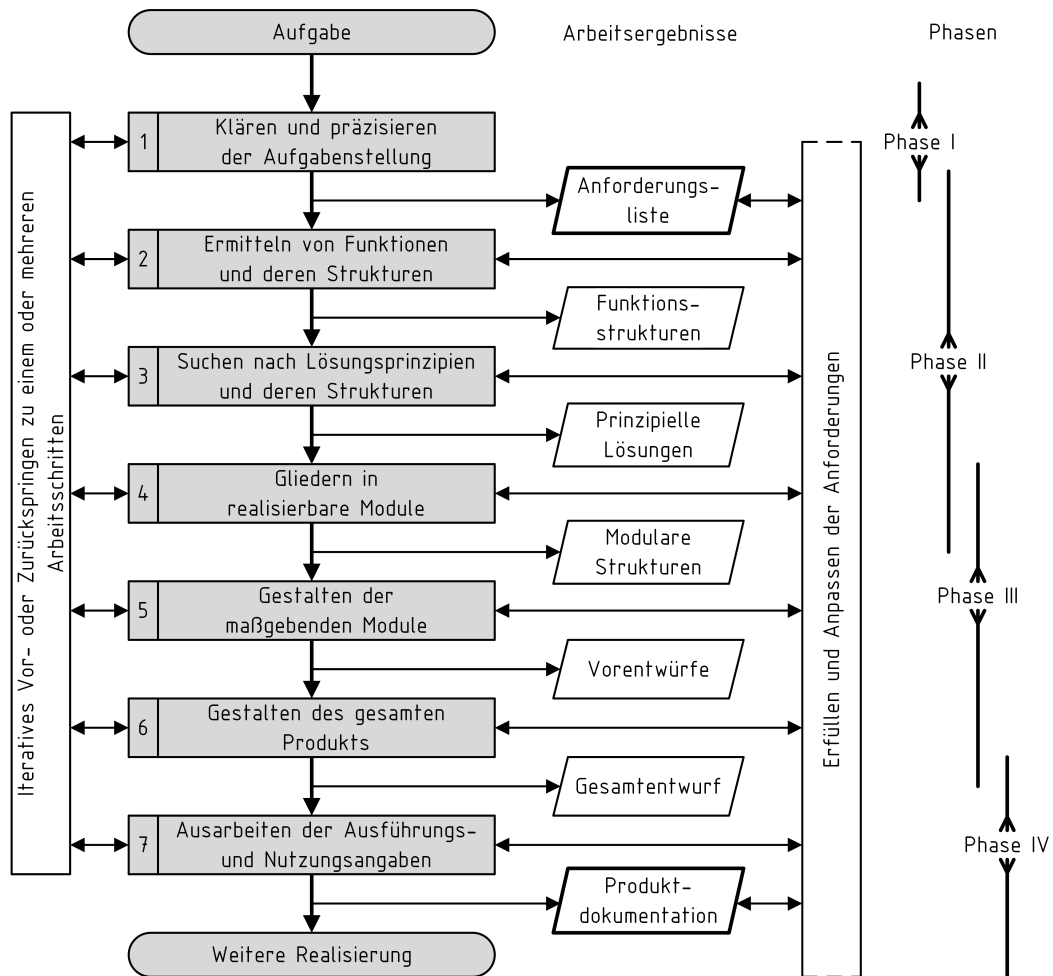


Abbildung 2.2: Vorgehen nach VDI 2221. In Anlehnung an VDI 2221 1993, S. 9

Vorgehensmodellen als einengendes, Kreativität behinderndes Konstrukt, was die Gefahr bei der Anwendung diskursiver Vorgehensmodelle ist.<sup>38</sup>

Die sieben Teilschritte des Vorgehens der VDI 2221 schließen, entsprechend der Diskursivität, mit aufeinander aufbauenden Ergebnissen ab, die, nach der Erstellung der Anforderungsliste als Grundlage des Entwicklungsprozesses<sup>39</sup>, allesamt zum Aufbau eines vollständigen Produktmodells beitragen. Eine vollständige – i.S. der Problemlösung pragmatische – Produktmodellierung bildet mit der Produktdokumentation den Abschluss des Entwicklungsprozesses.

Der siebenstufige Entwicklungsprozess wird von BIRKHOFFER in vier Subprozesse, vgl. Abbildung 2.3, unterteilt. Diese vier Subprozesse beinhalten die vorbereitenden Aufgaben des Entwicklers im Projektdefinitionsprozess (Klärung der Aufgabenstellung, Erstellen der Anforderungsliste), das Erarbeiten einer Lösung in Konzept- und Entwurfsprozess, sowie der Ausarbeitungsprozess, der den siebten Schritt der VDI 2221 beinhaltet.

Der Konzeptprozess schließt mit dem Vorliegen der prinzipiellen Gesamtlösung ab, er umfasst damit die Schritte zwei und drei der VDI 2221. BIRKHOFFER detailliert diese Schritte jedoch in Anlehnung an die verschiedenen Grade der Produktmodellkonkretisierung in vier Teilschritte (vgl. Abschnitt 4.1). In diesen werden die Produktfunktionen (Analog VDI 2221), physikalische Effekte und Wirkprinzipien festgelegt, und daraus prinzipielle Gesamtlösungen erarbeitet. Die letzten drei

<sup>38</sup> Ebenda.

<sup>39</sup> Vgl. VDI 2221 1993, S. 10.

---

Schritte entsprechen dem dritten Schritt in der VDI 2221, sind aber hinsichtlich der günstigen Möglichkeit der Einflussnahme auf den Produkterfolg, bestimmt durch den Innovationsgrad und die Kosten, in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses stärker detailliert.<sup>40</sup> Der Konzeptprozess ist methodisch in der VDI 2222 detailliert aufgearbeitet und bildet die Grundlage der Modell- und Methodenentwicklung in dieser Arbeit und wird in Kapitel 6 und 7 in Hinsicht auf die Baureihenentwicklung untersucht.

Im Entwurfsprozess werden weiter konkretisierte Produktmodelle aus den noch sehr abstrakten Modellen des Konzeptprozesses abgeleitet. Hierbei wird die grundlegende Gestalt des Produkts, durch die stofflichen und geometrischen Eigenschaften, festgelegt. Der Entwurfsprozess steht durch den hohen Detailgrad bereits in enger Wechselwirkung mit den Fertigungsprozessen und konkreten Aspekten von Nutzungsprozessen (z.B. ergonomische Anforderungen).

Dementsprechend setzen hier die Vorgehensmodelle des *Design for X* an. Diese spezialisierten Vorgehensmodelle, Gestaltungsrichtlinien und -hinweise werden entsprechend der Zielsetzung, wobei das X als Platzhalter für die jeweilige Spezialisierung steht, vom Entwickler als Ergänzung des allgemeinen Vorgehens verwendet. Beispielhaft seien das Design for Ergonomics mit dem menschenzentrierten Entwicklungsprozess<sup>41</sup> oder das Design for Manufacturing genannt, welches die Interaktion von Konstruktion und Fertigung hinsichtlich Fertigungsqualität, -kosten und -zeit zu optimieren versucht<sup>42</sup>.

Der Entwurfsprozess wird von der VDI 2223 unterstützt, hier werden dem Entwickler insbesondere Hinweise zum „Gliedern in realisierbare Module“ gegeben, wobei die prinzipielle Lösung in Gestaltungselemente wie Baugruppen oder Funktionsträger gegliedert wird<sup>43</sup>. Es wird ferner in Grob- und Feingestaltung unterschieden, wobei der Abstraktionsgrad abnimmt und der Detaillierungsgrad zunimmt. Die Gliederung und Detaillierung von Systemen wird in den Abschnitten 6.1, 6.5 und 7.2 verwendet.

**Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung:** Einen den Produktlebenslauf in den Fokus setzenden Entwicklungsprozess gibt BIRKHOFER mit dem *Modell für Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung*, GPPE, an, vgl. Abbildung 2.3. Das GPPE-Modell erlaubt die Darstellung der Interaktion zwischen den an die VDI 2221 angelehnten Phasen der Produktentwicklung und den *Produktlebenslaufprozessen*. Letztere werden durch die Entscheidungen des Entwicklers beeinflusst, während der Entwickler kontinuierlich Informationen aus den Lebenslaufprozessen antizipiert, um ein ganzheitlich erfolgreiches Produkt zu entwickeln. Parallel zur Entwicklung des Produkts setzt Birkhofer auch die Prozessentwicklung in den Fokus, denn parallel zur Produktentwicklung müssen nicht nur Nutzungs- und andere Prozesse antizipiert werden, sondern es werden auch Prozesse z.B. der Fertigung, Wartung etc. vom Entwickler aktiv festgelegt oder beeinflusst. Die Betonung der Prozessantizipation in der Entwicklung begünstigt die Berücksichtigung bestimmter aus dem Produktlebenslauf resultierender Interaktionen, z.B. die Umweltwirkung des Produkts, aber auch die Interaktion von Unsicherheit und Produkt im Sinne von Stör- und Nebengrößen sowie schwankender Flussgrößen. Zentral für die Nutzung des GPPE ist die laufende Analyse von Prozessen des Produktlebenslaufs als Informationsquelle für den Entwickler, BIRKHOFER verweist hier auf das Prozessmodell von HEIDEMANN.<sup>44</sup> Es liegt der Gedanke zugrunde, dass das Produkt

---

<sup>40</sup> Vgl. VDI 2221 1993, S. 3 ff. FELDHOUSEN und GROTE 2013b, S. 341 ff.

<sup>41</sup> Vgl. DIN EN ISO 9241-210 2011.

<sup>42</sup> Vgl. RIEG und STEINHILPER 2012, S. 450, FELDHOUSEN und GROTE 2013b, S. 583 ff. EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 287

<sup>43</sup> Vgl. VDI 2223 2004, S. 18.

<sup>44</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 76.

durch verschiedene Prozesse der Werkstoffherstellung, Produktion und der Entsorgung beeinflusst wird, aber auch die Nutzungsprozesse selbst beeinflusst, indem es eine Wirkgröße bereitstellt, und dadurch seinen von Kunden gewünschten Zweck erfüllt.<sup>45</sup> Nicht die Funktion, sondern die Realisierung des vom Kunden geforderten Prozesses steht im Vordergrund.

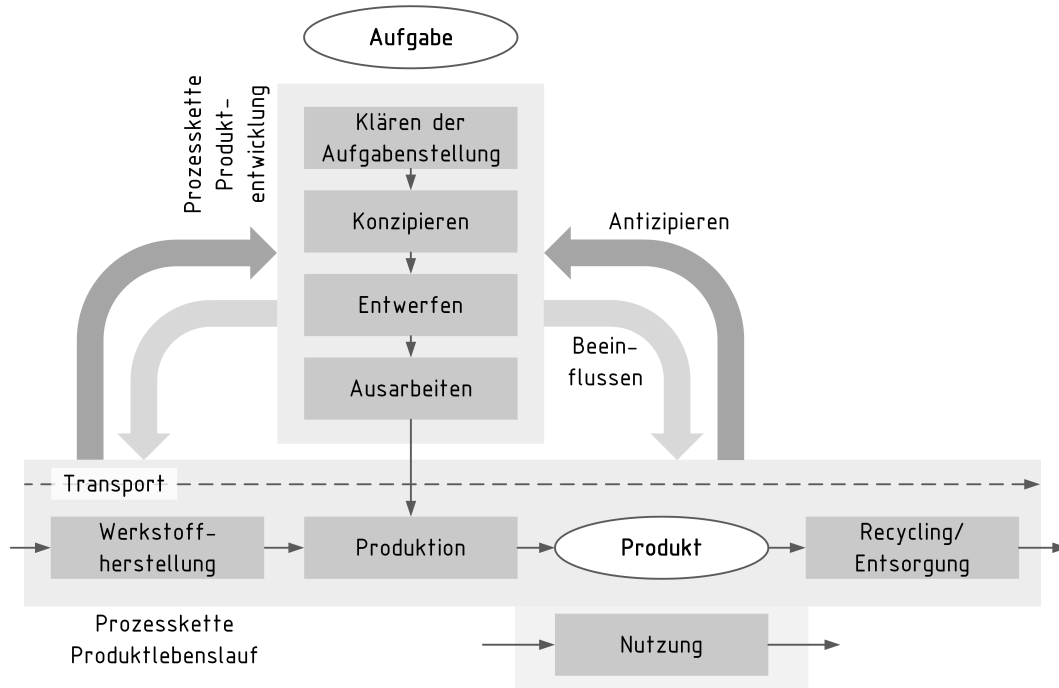


Abbildung 2.3: Das Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung, nach ABELE ET AL. 2005, S. 5.

Das GPPE-Modell dient als Basis des zu entwickelnden Vorgehensmodells zur Baureihenentwicklung (Kapitel 5).

**Axiomatic Design:** SUH bietet mit dem *Axiomatic Design*<sup>46</sup> einen von den klassischen Ansätzen deutlich verschiedenen Ansatz, bei dem der Entwickler durch die Abbildung von Elementen auf verschiedene *Domänen* zu einer Lösung gelangt.<sup>47</sup> Dazu werden vier Domänen nebeneinander angeordnet; die linke Nachbardomäne repräsentiert das Ziel, welches zu erreichen ist, die rechte Ebene die mögliche Lösung um das Ziel zu erreichen, vgl. Abbildung 2.4. Die Customer Domain repräsentiert die Kundenanforderungen, die dann auf die Functional Domain mittels eines *Mappings* übertragen werden. In der Functional Domain sind Functional Requirements, also funktionale Eigenschaften, aufgeführt, die sich zusammen mit Restriktionen (Constraints) aus den Anforderungen ergeben. Die Functional Requirements (FRs) realisieren die Kundenanforderungen, während die Constraints (CAs) den Rahmen für die Entwicklung vorgeben. Die Designparameter der Gestalt-Domäne (Physical Domain, DP) werden vom Produktentwickler im Folgenden festgelegt, die Prämisse hier ist die Funktionserfüllung, also das Realisieren der in der Functional Domain befindlichen Functional Requirements. Die Prozessdomäne dient der Realisierung der gewählten Designparameter; sie bildet die Fertigungsprozesse ab, die durch Prozessvariablen (Process Variables, PVs) festgelegt werden.

Das Mapping der verschiedenen Elemente der Domänen auf die sie realisierende nächste Domäne wird unter Beachtung von zwei Axiomen durchgeführt. Diese Axiome sind bei SUH 1990, S. 47

<sup>45</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 110.

<sup>46</sup> Die folgenden Ausführungen stammen aus SUH 1990 und SUH 1998.

<sup>47</sup> Vgl. SUH 1998, S. 204 ff.



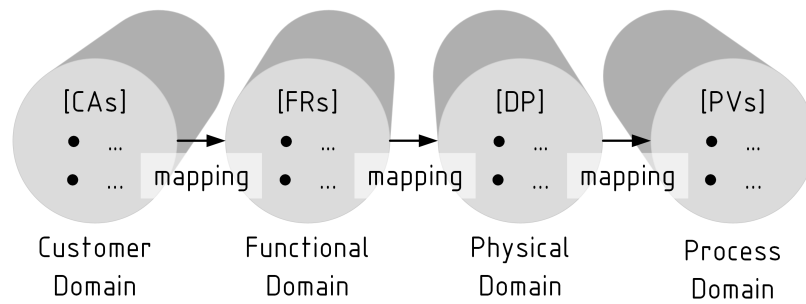


Abbildung 2.4: Die vier Domänen des Axiomatic Design, nach SUH 1998, S. 128.

ff. hergeleitet. Das erste Axiom ist das Unabhängigkeits-Axiom, welches den Mapping-Prozess zwischen der Funktionsdomäne und der Gestaltdomäne betrifft. Die Funktionseigenschaften sind so zu wählen, dass sie auf der Funktionsebene – nicht zwingend auf der Gestaltebene! – voneinander unabhängig sind.<sup>48</sup> Dadurch wird sichergestellt, dass das System in beherrschbare Funktionsträger zu zerlegen ist, was die Lösungsfindung erleichtert. Durch das Vermeiden von Abhängigkeiten wird außerdem sichergestellt, dass nur die minimale Anzahl an Funktionseigenschaften verwendet wird. Das Informations-Axiom besagt, dass unter allen geeigneten Lösungen (als solche betrachtet SUH die Lösungen, die das Unabhängigkeits-Axiom befriedigen und eine Zielerreichung in Hinblick auf die Kundenanforderungen ermöglichen) diese am besten ist, welche mit der geringsten Menge an Information beschrieben wird. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen Erfüllung der Funktionseigenschaften durch Designparameter maximiert.

Der Ansatz des Domänen-Mappings bildet die Grundlage zur Identifikation von Skalierungskritischen Eigenschaften, vgl. S. 107 und Unterabschnitt 7.3.2.

**Münchener Vorgehensmodell:** Neben den stark prozedural orientierten Entwicklungsprozessen wie der VDI 2221 gibt es auch Entwicklungsprozesse, die sich stärker an Problemlöseprozessen, wie sie in der Kognitionswissenschaft verstanden werden, anlehnen. Ein klassischer Vertreter dieser Art ist das Münchener Vorgehensmodell von Lindemann, welches auf dem *TOTE-Schema* (Test-Operate-Test-Exit) der Kognitionswissenschaft aufbaut, und der prozeduralen Orientierung VDI-2221-artiger Modelle eine flexible Netzwerkstruktur entgegensetzt<sup>49</sup>. Das Vorgehen kann problemspezifisch für jede Aufgabe eines jeden Entwicklungsprozesses neu abgeleitet und angepasst werden, wobei es auch hier häufiger auftretende Muster gibt.

Das Münchener Vorgehensmodell bildet zusammen mit der Uncertainty Modes and Effects Analysis die Grundlage zur Beherrschung von Skalierungsmodellunsicherheit und zur systematischen Skalierungsmodellkonkretisierung, vgl. Abschnitt 7.2.

### 2.1.3 Produktlebenslauf

Es ist in der Produktentwicklung Konsens, dass eine ganzheitliche Betrachtung des Produktlebenslaufes die Entwicklung von Produkten höherer Qualität und geringerer Unsicherheit bietet. Die Betrachtung der Materialherstellung, insbesondere aber der Fertigung und Nutzung des Produkts sind für die Entwicklung von skalierbaren Produkten elementar.

Aus der Materialherstellung können Informationen über die Größenabhängigkeit der Materialeigenschaften abgeleitet werden. Die in den Herstellprozessen erreichbare Qualität hängt auch von der

<sup>48</sup> Vgl. SUH 1998, S. 205.

<sup>49</sup> Vgl. LINDEMANN 2009, S. 40 ff. EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 85 ff.

---

Bauteilgröße ab<sup>50</sup>, insbesondere aber bringt die Fertigung oft Restriktionen in der Skalierbarkeit mit sich (bspw. minimale Wanddicken beim Gießen oder Schweißen, Zugänglichkeit in Hinsicht auf Fügeverfahren oder Montageprozesse, Oberflächengüten mit Einfluss auf die Funktionserfüllung, minimal erreichbare Fertigungsqualität etc.). Diese Restriktionen müssen im Entwicklungsprozess antizipiert werden, um insbesondere auf Gestaltebene einen Entwurf der Baureihe zu erarbeiten, der sich entsprechend der Forderungen nach möglichst gleicher Fertigung (Rationalisierung der Fertigungsprozesse) auch in den Herstellprozessen im Rahmen der Anforderungen und Gegebenheiten mit minimalen Kosten bei hoher Qualität umsetzen lässt. Hier gibt es zudem Interaktionen mit den klassischen Ansätzen des Design for X, z.B. des Design for Manufacturing und weiteren Gestaltungsrichtlinien.

Die Antizipation der Nutzungsprozesse ist unabdingbar zur Erfüllung der Kundenbedürfnisse, also zum Erreichen einer hohen Qualität i.S. der bestmöglichen Erfüllung der Kundenerwartung. Dies kann u.A. durch ein sich hinsichtlich der Nutzungsbedingungen robust verhaltendes Produkt erreicht werden. Diese Robustheit soll auch in der Baureihe sichergestellt werden. Die Nutzungsprozesse sind außerdem Grundlage für eine Analyse der Produktumgebung, aus der skalierungsrelevante Anforderungen abgeleitet werden können.

Ein – im Rahmen dieser Arbeit verwendetes – Modell zur Darstellung des Produktlebenslaufs sowie der Interaktion zwischen Produktentwicklung und Produktlebenslauf stellt das *Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung* (GPPE) von BIRKHOFFER dar, welches auch ein Produktlebenslaufmodell beinhaltet.<sup>51</sup>

---

#### 2.1.4 Prozesse und Prozessmodelle

---

Die Ausführungen zu *Prozessen* und *Prozessmodellen* sollen mit Blick auf ihre Anwendbarkeit in der Baureihenentwicklung auf technische Prozesse beschränkt bleiben. Prozessmodellierungen aus dem Bereich *Business Process Management* (BPM) o.Ä. sind der Literatur zu entnehmen.<sup>52</sup>

Ein technischer Prozess überführt ein stoffliches Objekt von einem Anfangs- in einen Endzustand.<sup>53</sup> Damit dient er einem Zweck, nämlich der Veränderung des Objekts, auch Operand genannt.<sup>54</sup>

Die Transformation wird durch eine auf den Operanden einwirkende Wirkgröße, ausgehend von einem Operator, erreicht.<sup>55</sup> Ein solcher technischer Prozess lässt sich durch Verkürzung des betrachteten Zeitintervalls (der Zeitpunkt, zu dem Anfangs- bzw. Endzustand betrachtet werden, wird verändert) auch in Teilprozesse aufspalten, womit die Granularität erhöht wird und detailliertere Aussagen möglich werden.<sup>56</sup>

Grundlage der weiteren Betrachtung von Prozessmodellierung in dieser Arbeit ist das auf HEIDEMANN zurückgehende Prozessmodell<sup>57</sup> (vgl. Abbildung 2.5).<sup>58</sup> Dieses Modell wurde im Laufe der Zeit zur Modellierung von Unsicherheit mehrfach weiterentwickelt.<sup>59</sup> Dabei wird die bereits

---

<sup>50</sup> Vgl. DIN EN ISO 286-1 2010.

<sup>51</sup> Vgl. ABELE ET AL. 2005, S. 5.

<sup>52</sup> Bspw. KO ET AL. 2009.

<sup>53</sup> Vgl. HUBKA und EDER 1988, S. 23

<sup>54</sup> Vgl. HUBKA und EDER 1988, S. 22, 23 und 41 f.

<sup>55</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 76 und 78.

<sup>56</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 79 f.

<sup>57</sup> Welches selbst wiederum Anleihen bei HUBKA & EDER nimmt.

<sup>58</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 76.

<sup>59</sup> Von besonderer Relevanz für diese Arbeit sind insbesondere KLOBERDANZ ET AL. 2009, S. 2-471, FREUND ET AL. 2014, S. 150 und LOTZ ET AL. 2015, S. 6309.



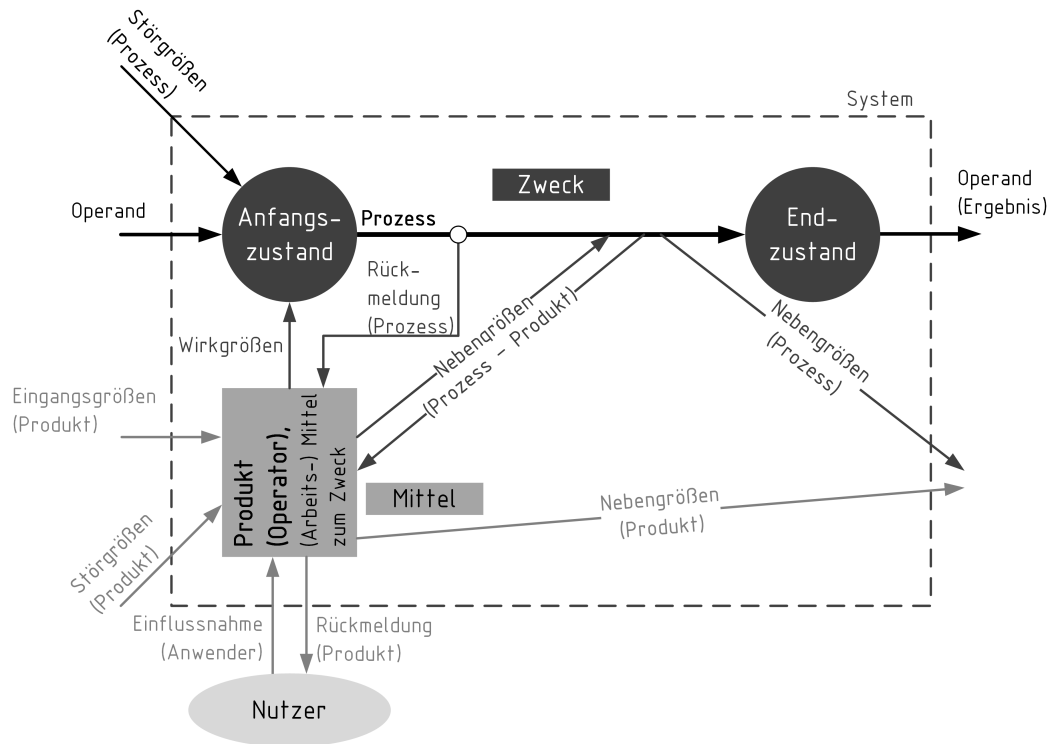


Abbildung 2.5: Das erweiterte Prozessmodell nach HEIDEMANN, vgl. HEIDEMANN 2001, S. 76.

von HEIDEMANN eingeführte Modellierung von Stör- und Nebengrößen<sup>60</sup> aufgegriffen und vertieft. Diese erweiterten Prozessmodelle sind mit der Absicht entwickelt worden, die immer in Prozessen auftretende Unsicherheit, vgl. Abschnitt 2.3, detailliert abzubilden, um durch die so gewonnene Information das die Unsicherheit konstituierende Informationsdefizit, vgl. Unterabschnitt 2.3.1, zu reduzieren und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit ergreifen zu können. KLOBERDANZ ET AL. führen dazu die Unsicherheit in Prozessen auf interne und externe Unsicherheit zurück, basierend auf den beteiligten Prozesselementen, vgl. Tabelle 2.1.

GRAMLICH stellt ferner fest, dass Operanden technischer Prozesse ausschließlich stoffliche Objekte sein können.<sup>61</sup> Der bei HEIDEMANN und KLOBERDANZ ET AL. sowie in den Veröffentlichungen des SFB 805 als Black-Box modellierte Operator wird zuerst bei FREUND ET AL. durch eine Darstellung einer Funktionsstruktur (alternativ sind auch Baustrukturen möglich) erweitert; hierdurch wird eine genauere Bestimmung der Einwirkung von Stör- und Nebengrößen sowie Varianz auf einzelne Bereiche des Operators möglich; ihre Auswirkung kann in der Folge besser antizipiert werden. Der Operator kann vom Entwickler durch den Einsatz von Methoden aus dem Robust Design unempfindlich gegenüber der auftretenden Unsicherheit gemacht werden.<sup>62</sup>

Die Übertragung dieser präziseren Modellierung von Interaktionen mit dem Arbeitsmittel (Operator) wird von LOTZ ET AL. auf die Entwicklung von Baureihen von Produkten mit nicht physikalisch ähnlich skalierenden Elementen technischer Prozesse übertragen; hierzu wird der technische Prozess in allen Prozessvarianten (abhängig von der Skalierung des Operanden) hinsichtlich auftretender

<sup>60</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 102 ff.

<sup>61</sup> Vgl. GRAMLICH 2013, S. 62 f.

<sup>62</sup> Vgl. FREUND ET AL. 2014, S. 149 und 152 ff.

Interne Unsicherheit	Beispiel	Externe Unsicherheit	Beispiel
Prozessabweichungen	nichtlineares Verhalten des Verfahrens (Abhängigkeit zwischen Vorschub und Schlagenergie)	Abweichungen von Eigenschaften des Nutzers, der Ressourcen und der Umgebung	Der Nutzer stellt eine schwankende Vorschubkraft bereit
Ungenügende Definition von Effekteigenschaften im Entwicklungsprozess	Nicht abgestimmte Schlagenergie, Drehgeschwindigkeit und Schlagfrequenz einer Schlagbohrmaschine: ungenügendes Bohrergebnis	Störgrößeneinfluss auf Operator, Operand oder Prozess	Feuchtigkeit kann den Bohrprozess beeinflussen
Abweichendes Verhalten des Arbeitsmittels	klassisch: Verschleiß- und Alterungserscheinungen wie das Abstumpfen des Bohrers	Störgrößeneinfluss auf das Arbeitsmittel umgebende Prozesselemente	Bohrlärm wird von den Nachbarn nicht mehr akzeptiert
Nebengrößen zwischen Prozess und Arbeitsmittel	Bohrstaub kann die Lagerlebensdauer reduzieren	Varianz in den Operandeneigenschaften am Anfangszustand	hohe Festigkeit und Steifigkeit der Wand, in die ein Loch gebohrt werden soll, kann zu Geometrieabweichungen der Bohrung führen

Tabelle 2.1: Interne und externe Unsicherheit in Prozessen am Beispiel einer Schlagbohrmaschine. Nach KLOBERDANZ ET AL. 2009, S. 2-472.

Unsicherheit untersucht, womit Lösungen synthetisiert werden können, die sich über den ganzen Skalierungsbereich einer Baureihe hinweg robust verhalten.<sup>63</sup>

## 2.2 Modellwissenschaft und Ähnlichkeit

Die Modellwissenschaft bildet die Basis der Skalierungsmethoden. Hier findet sich eine Einführung in die Theorie dimensionsloser Kenngrößen. Dies geht von der Skalenunabhängigkeit physikalischer Effekte aus.

### 2.2.1 Das Konzept der Ähnlichkeit

Das Konzept der *Ähnlichkeit* soll an dieser Stelle nur für den technisch-physikalischen Bereich erläutert werden, da andere, bspw. aus der Linguistik, Philosophie und Psychologie bekannte Begriffsverwendungen für diese Arbeit nicht relevant sind.

<sup>63</sup> Vgl. LOTZ ET AL. 2015, S. 6308 ff.

Frühe Beschreibungen von Ähnlichkeit finden sich bereits in der griechischen Antike, bspw. hat Euklid die Ähnlichkeit von Figuren in seinem Werk „Elemente“ beschrieben.<sup>64</sup> Dabei geht er auf die geometrische Ähnlichkeit, beschrieben anhand der Eigenschaften der Figuren, ein. Am Beispiel des in Abbildung 2.6 dargestellten Dreiecks gibt er die Bedingung geometrischer Ähnlichkeit bereits als Verhältnisgröße an (Notation angepasst)<sup>65</sup>:

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2}, \quad \frac{a_1}{c_1} = \frac{a_2}{c_2} \quad (2.1)$$

woraus folgt

$$\frac{b_2}{b_1} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{c_2}{c_1} = \varphi_L \quad (2.2)$$

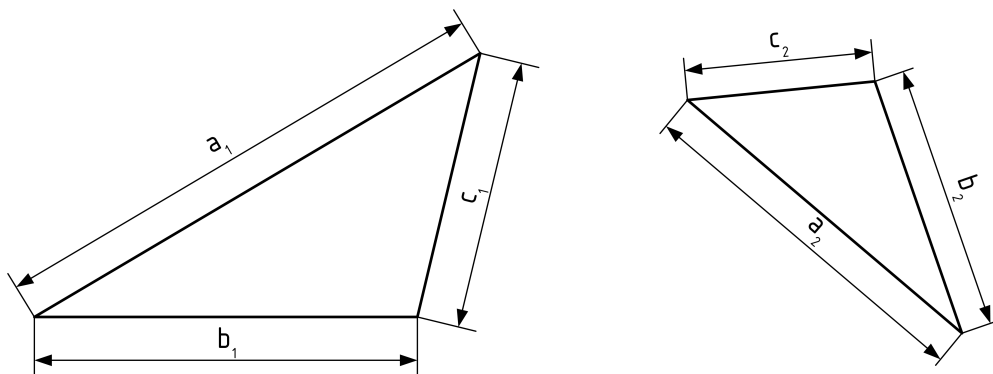


Abbildung 2.6: Geometrische Ähnlichkeit zweier Dreiecke mit gleichen Seitenverhältnissen.

DEIMEL leitet darüber hinaus die perspektivische Ähnlichkeit aus der geometrischen Ähnlichkeit ab.<sup>66</sup>

Hinsichtlich der Art der Ähnlichkeit kann über die Geometrie hinaus in verschiedene Kategorien unterschieden werden:

- *Physikalische Ähnlichkeit*: Physikalische Ähnlichkeit baut auf der geometrischen Ähnlichkeit auf. Es wird zudem vorausgesetzt, dass physikalische Ereignisse in einem geometrisch ähnlichen System unter der Wirkung gleicher physikalischer Ursachen (also gleicher physikalischer Effekte) ähnlich ablaufen; sie werden durch den gleichen analytischen Ansatz und gleiche Relationen beschrieben.<sup>67</sup>
- *Funktionale Ähnlichkeit*: Unter funktioneller Ähnlichkeit wird die Identität der Funktion eines technischen Systems verstanden, beispielsweise erfüllen sowohl ein hydraulisch übersetzter Zylinder als auch ein zweiseitiger Hebel die Funktion „Kraft verstärken“ und sind damit ähnlich. Diese Ähnlichkeit kann im Rahmen dieser Arbeit für die Synthese skalierungsrobuster Systeme genutzt werden, wenn für eine zu realisierende Funktion Lösungen basierend auf verschiedenen Effekten gesucht werden (vgl. Unterabschnitt 7.4.1).<sup>68</sup>

<sup>64</sup> Vgl. EUCLID 1651, S. 205 ff.

<sup>65</sup> Vgl. EUCLID 1651, S. 213.

<sup>66</sup> Vgl. DEIMEL 2007, S. 3.

<sup>67</sup> Vgl. WEBER 1930, S. 276.

<sup>68</sup> Vgl. DEIMEL 2007, S. 6.

- *Strukturelle Ähnlichkeit*: Die strukturelle Ähnlichkeit bezieht sich auf die Struktur von Systemen, welche aus verschiedenen Elementen zusammengesetzt sind, in der Literatur chemische Verbindungen. Anhand graphentheoretischer Ansätze wird der Grad der Übereinstimmung verschiedener Strukturen ermittelt.<sup>69</sup>
- *Ähnlichteile*: SCHUNKE bewertet die Ähnlichkeit verschiedener Bauteile anhand des Vergleichs der Relationen zwischen Eigenschaften sowie mithilfe metrischer Distanzmaße für die Eigenschaften<sup>70</sup>, ein Ansatz, der zur Übertragung von Wissen mit Hilfe von Skalierungsmethoden nützlich ist (vgl. Unterabschnitt 7.4.2)

Weiterhin wird der Begriff der Ähnlichkeit auch in der *Eigenschaftstheorie* verwendet und von WÄLDELE definiert<sup>71</sup>:

- *Objektgleichheit*: die Eigenschaften der Objekte sind identisch
- *Objektähnlichkeit*: die Merkmale der Objekte sind identisch, die Ausprägung unterscheidet sich
- *Objektunterschiedlichkeit*: Objekte mit unterschiedlichen Merkmalen sind unterschiedlich

Auf die Baureihe trifft hier die Objektähnlichkeit i.S. der Eigenschaftstheorie zu; eine eigenschaftsbasierte Beschreibung von Produktmodellen, auf deren Basis Baureihen entwickelt werden sollen, ist demnach auch begrifflich konsistent zur Modellwissenschaft. Dies ist die Grundlage der später zu entwickelnden Modellwelt, vgl. Abschnitt 6.2.

Ähnlichkeit lässt sich mathematisch unterschiedlich formalisieren; neben der Verwendung von Ähnlichkeitskennzahlen, welche für diese Arbeit zentral sind, vgl. Unterabschnitt 2.2.2, sind dies merkmalsbasierte Ähnlichkeitsmaßzahlen, die auf verschiedenen Distanzmaßen aufbauen. Sie sind in der Literatur<sup>72</sup> ausreichend behandelt, werden hier aber nicht weiter verwendet, da sich ihr Nutzen im Kontext dieser Arbeit auf eine mögliche technische Umsetzung von Algorithmen zur Identifikation von Referenzprodukten, vgl. Unterabschnitt 7.4.2, beschränkt.

Zentral für die vorliegende Arbeit ist hiervon, neben der bereits angesprochenen Nützlichkeit funktionaler Ähnlichkeit, die physikalische Ähnlichkeit. Sie wird im folgenden Kapitel eingehender besprochen, ebenso die auf der physikalischen Ähnlichkeit basierende Modellwissenschaft, aus welcher sich die klassische Entwicklungsmethodik für Baureihen entwickelt hat.

---

## 2.2.2 Dimensionshomogenität und Pi-Theorem

---

Der Gegenstand natur- und ingenieurwissenschaftlicher Betrachtungen ist die Beschreibung natürlicher Phänomene, die messtechnisch erfasst oder anderweitig quantifiziert werden sollen. Diese erfassten oder berechneten Daten sind physikalische Größen, zusammengesetzt aus einem Zahlenwert  $\{x_i\}$  und seiner Einheit  $[x_i]$ , die auf eine Bezugsgröße zurückzuführen ist<sup>73</sup>:

$$x_i = \{x_i\} \cdot [x_i] \quad (2.3)$$

---

<sup>69</sup> Vgl. SCHÄDLER 1999, S. 14 ff.

<sup>70</sup> Vgl. SCHUNKE 1990, S. 39 ff.

<sup>71</sup> Vgl. WÄLDELE 2012, S. 17.

<sup>72</sup> Vgl. SCHUNKE 1990, S. 41.

<sup>73</sup> Vgl. DIN 1313 1998, S. 5.

Physikalische Größen werden entsprechend des *Internationalen Einheitensystems*<sup>74</sup> (SI) in Basisgrößen mit ihren Dimensionen eingeteilt, vgl. Tabelle 2.2.

Basisgröße	Basiseinheit	Dimension	Symbol
Kilogramm	<i>kg</i>	Masse	<i>M</i>
Meter	<i>m</i>	Länge	<i>L</i>
Sekunde	<i>s</i>	Zeit	<i>T</i>
Kelvin	<i>K</i>	Temperatur	$\Theta$
Ampere	<i>A</i>	Stromstärke	<i>I</i>
Mol	<i>mol</i>	Stoffmenge	$\nu$
Candela	<i>cd</i>	Lichtintensität	<i>I<sub>L</sub></i>

Tabelle 2.2: Internationales Einheitensystem

Basisgrößen können nicht aus weiteren Einheiten abgeleitet werden. Die Dimension einer Basisgröße ist nach HELMHOLTZ ein generalisierter Oberbegriff der Einheit.<sup>75</sup> Die SI-Einheiten weisen absolute Nullpunkte auf ( $\delta_i = 0$ ), sie sind durch eine Skalierung des Einheitenmaßstabs jedoch in andere Einheiten überführbar:

$$x'_i = \lambda_i x_i + \delta_i \quad (2.4)$$

Für einen absoluten Nullpunkt der Skala gilt für zwei verschiedene physikalische Größen derselben Basisgröße auch (BRIDGEMAN-Postulat)<sup>76</sup>

$$x'_i/y'_i = x_i/y_i \quad (2.5)$$

Aus dieser Invarianz von Quotienten von Basisgrößen oder linearen Skalentransformationen derselben Größen leitet BRIDGEMAN die „absolute Bedeutung relativer Größen“ ab<sup>77</sup>, welche die Grundlage für alle Skalierungsmethoden der folgenden Kapitel darstellt.

Die Invarianz von Quotienten der Basisgrößen erlaubt es, einen allgemeinen Zusammenhang zwischen den Basisgrößen  $x_i$ , einer Konstanten  $C$  und abgeleiteten Größen  $x_j$  abzubilden<sup>78</sup>:

$$x_j = C_j x_1^{\gamma_{j1}} x_2^{\gamma_{j2}} \dots x_r^{\gamma_{jr}} \quad (2.6)$$

Die physikalische Dimension einer abgeleiteten physikalischen Größe bestimmt sich äquivalent über die Relationen der Basisgrößen:

$$\dim(x_j) = \dim(x_1^{\gamma_{j1}}) \cdot \dim(x_2^{\gamma_{j2}}) \dots \dim(x_r^{\gamma_{jr}}) \quad (2.7)$$

Weiterhin gilt die Dimensionshomogenität als fundamentales Prinzip der Naturwissenschaft; sie ist eine notwendige Bedingung für die Korrektheit und Vollständigkeit einer physikalischen Modellvorstellung. Es muss gelten, dass das physikalische Modell sich in die Form

<sup>74</sup> Vgl. DIN 1313 1998, S. 4.

<sup>75</sup> Vgl. RUDOLPH 2002, S. 10.

<sup>76</sup> Vgl. SPURK 1992, S. 13.

<sup>77</sup> Vgl. BRIDGMAN 1963, S. 21.

<sup>78</sup> Vgl. BRIDGMAN 1963, S. 21.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (2.8)$$

überführen lässt, woraus mit (2.7) die Dimensionshomogenität folgt.

Die Dimensionsanalyse beruht auf der Erkenntnis, dass die Information einer solchen Beschreibung eines physikalischen Zusammenhangs, welche aus dem Maßsystem kommt, irrelevant für die Beschreibung des Phänomens selbst ist (absolute Bedeutung haben nach BRIDGEMAN, s.o., nur relative Größen), weshalb eine dimensionslose Darstellung des Problems eine geringere Komplexität i.S. einer geringeren notwendigen Informationsmenge aufweist, die Zahl der Variablen also sinkt.<sup>79</sup> Ein Zusammenhang, der von  $n$  physikalischen Größen aus  $r$  Basisgrößen beschrieben wird, kann durch  $n - r$  dimensionslose Kennzahlen  $\Pi_i$ , vgl. (2.9), beschrieben werden<sup>80</sup> (vgl. (2.10)), auch bekannt als Teil des *Pi-Theorems von BUCKINGHAM*, eine umfangreiche Herleitung ist der Literatur zu entnehmen<sup>81</sup>:

$$\dim(\Pi_i) = 1 \quad (2.9)$$

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}) = 0 \quad (2.10)$$

Letztlich können, aus der Dimensionshomogenität und dem Pi-Theorem folgend, physikalische Zusammenhänge immer zu dimensionslosen Zusammenhängen umgeschrieben werden; im dimensionslosen Pi-Raum bestimmte Lösungen können dann in den dimensionsbehafteten Raum zurück transformiert werden.<sup>82</sup> Zu beachten ist hierbei, dass, vgl. (2.11), der Wert einer dimensionslosen Kennzahl nicht einer technischen Realisierung eindeutig zugeordnet ist. Einem technischen System ist ein Zahlenwert der dimensionslosen Beschreibung zugeordnet, gleichzeitig existieren unendlich viele Realisierungen anderer Systeme, die denselben Wert der gleichen Kennzahl annehmen. Dadurch ist die Transformation aus dem  $\Pi$ -Raum in den dimensionsbehafteten Raum nicht eindeutig.

Dies ist die Basis der Skalierung technischer Systeme, sowohl auf dimensionsanalytischem Wege als auch bei der Skalierung durch Nutzung von Wachstumsgesetzen. Verschiedene Systeme gleicher dimensionsloser Kennzahl verhalten sich ähnlich und können voneinander über die dimensionslose Beschreibung abgeleitet werden. Beide unterscheiden sich primär durch die Art der dimensionslosen Kennzahlen: Wachstumsgesetze werden durch *Grundähnlichkeiten* ausgedrückt, wobei Basisgrößen mehrfach auftreten können, während auf dimensionsanalytischem Wege komplexere *Kennzahlen* genutzt werden können.

---

### 2.2.3 Physikalische Ähnlichkeit

---

Über die reine Gestaltähnlichkeit hinausgehend, führt MACH die physikalische Ähnlichkeit ein. Er differenziert in Ähnlichkeit und Analogie, wobei er die Ähnlichkeit als Übereinstimmung von Merkmalen betrachtet, während gleiche Gesetze hinter einem direkt beobachtbaren Merkmal als Analogie betrachtet werden.<sup>83</sup> Die Nutzung dieser Analogie – welche physikalischer Ähnlichkeit i.S. dieser Arbeit entspricht – beschreibt MACH wie folgt:

---

<sup>79</sup> Vgl. SPURK 1992, S. 15.

<sup>80</sup> Vgl. BUCKINGHAM 1914, S. 387 f. in der Notation von SPURK 1992, S. 15.

<sup>81</sup> Vgl. SPURK 1992, S. 33-37 bzw. im Original BUCKINGHAM 1914.

<sup>82</sup> Vgl. RUDOLPH 2002, S. 20.

<sup>83</sup> Vgl. MACH 1917, S. 5.

*„Das Leitmotiv der Ähnlichkeit und Analogie erweist sich in mehrfacher Hinsicht als treibend und fruchtbar für die Erweiterung der Erkenntniß. Ein noch wenig geläufiges Thatsachengebiet N offenbare in irgend einer Weise seine Analogie zu einem uns geläufigeren, der unmittelbaren Anschauung zugänglicheren Gebiet M. Sofort fühlen wir uns angetrieben in Gedanken, durch Beobachtung und Experiment zu den bekannten Merkmalen oder Beziehungen der Merkmale von M die Homologen von N aufzusuchen. Unter diese Homologen werden sich im Allgemeinen bislang unbekannte Thatsachen des Gebietes N finden, die wir auf diese Weise entdecken.“<sup>84</sup>*

Dieses Ziel entspricht den Bestrebungen des Einsatzes des Ähnlichkeitsprinzips bei WEBER<sup>85</sup> im Rahmen der Modellwissenschaft und im konkreten technischen Anwendungsfall<sup>86</sup>, und bildet damit die konzeptuelle Grundlage des Ähnlichkeitsverständnisses, welches dieser Arbeit zugrunde liegt. Diese Wahl basiert darauf, dass die Entwicklung technischer Systeme einen Zweck verfolgt, der durch das (Arbeits-)Mittel, vgl. Unterabschnitt 2.1.4, realisiert wird. Die Funktionen des Arbeitsmittels werden durch physikalische Effekte konkretisiert, daher liegt die Beachtung physikalischer Ähnlichkeit beim Skalieren technischer Systeme nahe und wird seit jeher in der Baureihenentwicklung so verwendet.<sup>87</sup>

Voraussetzung ist weiterhin die Beschreibbarkeit der Phänomene als Potenzprodukt, vgl. Unterabschnitt 2.2.2, sowie dass Vorgänge auf molekularer und atomarer Ebene aufgrund der grundsätzlich anderen Gesetzmäßigkeiten der Quantenphysik unterliegt; physikalische Ähnlichkeit bezieht sich daher auf die klassische Mechanik.<sup>88</sup> Diese Beschreibung lässt sich mathematischer fassen, wenn auf das  $\Pi$ -Theorem zurückgegriffen wird, vgl. Unterabschnitt 2.2.2; physikalische Ähnlichkeit liegt dann vor, wenn der Sachverhalt vom gleichen  $\Pi$ -Satz  $S = (\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_m)$  beschrieben wird (also vom gleichen Satz dimensionsloser Kennzahlen), und derselbe *Zustandspunkt* vorliegt, also von den  $m$  Elementen des  $\Pi$ -Satzes für beliebige  $m - 1$  die Bedingung

$$\Pi_i = \text{idem} \quad (2.11)$$

gilt.<sup>89</sup>

Aus Sicht axiomatischer Beschreibung führt ein identischer Zustandspunkt eines Systems im  $\Pi$ -Raum dazu, dass die Differenzialgleichungen des Modells mit denen der Hauptausführung übereinstimmen.<sup>90</sup>

Dieser Beschreibung folgen auch die anderen stärker physikalisch-mathematisch geprägten Quellen zur Dimensionsanalyse und Ähnlichkeitstheorie.<sup>91</sup>

Unter technischen Aspekten vorteilhaft ist die weniger abstrakte Definition von CONRAD ET AL.:

<sup>84</sup> Aus MACH 1917, S. 10.

<sup>85</sup> Vgl. WEBER 1930, S. 287 ff.

<sup>86</sup> Vgl. HERRMANN 1930, S. 373 ff. und LEHMANN 1959, S. 470 ff.

<sup>87</sup> So in CONRAD ET AL. 1977, S. 81 f. GERHARD 1969, S. 1013 f. GERHARD 1971, S. 6, PAHL und BEITZ 1974a, S. 71 f. VIETOR und STECHERT 2013, S. 820 f.

Zu beachten ist jedoch, dass für die Baureihenentwicklung in diesen Quellen die physikalische Ähnlichkeit zwar den Grundgedanken vorgibt, durch das Auftreten oft mehr als eines physikalischen Effekts können jedoch nicht alle Grundähnlichkeiten (tabellarische Auflistung vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 821 berücksichtigt werden, es werden dann aus Ähnlichkeitsgesetzen spezielle Skalierungsgesetze – die Wachstumsgesetze – abgeleitet.

<sup>88</sup> Vgl. WEBER 1930, S. 277.

<sup>89</sup> Vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 95 und STICHLMAIR 1990, S. 111.

<sup>90</sup> Vgl. ROTH 2000, S. 265.

<sup>91</sup> Vgl. BRIDGMAN 1963, 82 f. BUCKINGHAM 1914, S. 373 ff. SEDOV 1959, S. 9 f. und ZOHURI 2015, S. 112 ff.



---

„Vorgänge sind physikalisch ähnlich, wenn Grundgrößen und abgeleitete Größen der beschreibenden Gleichungen in einem festen Verhältnis stehen.“<sup>92</sup>

Zusätzlich gibt es die teilweise/partielle Ähnlichkeit, bei der die o.g. Bedingungen nicht vollständig erfüllt werden.<sup>93</sup> SPURK differenziert darüber hinaus zwischen Modelleffekten, also beispielsweise Abweichungen von der geometrischen Ähnlichkeit aufgrund unterschiedlicher relativer Rauheit oder nicht geometrisch ähnlich skalierten Spaltmaße, sowie darüber hinaus gehender *unvollständiger Ähnlichkeit*.<sup>94</sup> Mögliche Gründe für diese in der Baureihenentwicklung (BRE) als *Halbähnlichkeit* bezeichneten Abweichungen von vollständiger Ähnlichkeit sind in Abschnitt 4.1 und der Literatur zu finden.<sup>95</sup> Der einfachen Skalierung vollständig ähnlicher Systeme stehen die schwieriger zu skalierenden unvollständig ähnlichen bzw. halbähnlichen Systeme gegenüber<sup>96</sup>, welche zudem deutlich stärker durch Modellunsicherheit geprägt sind, vgl. Abschnitte 3.3 und 3.5.

---

## 2.2.4 Skalierung von Modellen

---

Die Übertragbarkeit von Wissen über Modelle auf einen anderen Maßstab ist, bei vorhandener physikalischer Ähnlichkeit, von BRIDGEMAN beschreiben.<sup>97</sup> PAWLOWSKI stellt die Ähnlichkeitstheorie auf ein mengentheoretisches Fundament, indem er physikalische Größen verschiedener Entitäten über *Relationen* verknüpft, welche den physikalischen Sachverhalt wiedergeben. Die physikalischen Größen setzt er zur dimensionslosen Quantifizierung immer in Bezug zu einer Maßeinheit gleicher Entität.<sup>98</sup> Dies basiert auf dem Pi-Theorem von BUCKINGHAM, vgl. Unterabschnitt 2.2.2, und entspricht dem Ansatz, der auch mit den Stufensprüngen in der Baureihenentwicklung die Grundlage der Skalierung bildet, vgl. Unterabschnitt 2.2.5.

Ein zentraler Anwendungsfall der Modelltheorie ist die Übertragung von Informationen, die an physischen Modellen mit zum technischen System unterschiedlichem Maßstab gewonnen wurden. Diese Methode wird auch *Modelluntersuchung* genannt, das technische System im Anwendungsmaßstab wird in Abgrenzung zum Modell *Hauptausführung* genannt.<sup>99</sup> Hierbei können nach CONRAD ET AL., neben der Nutzung zur Entwicklung von Baureihen, verschiedene Fälle differenziert werden:<sup>100</sup>

- Entwicklung von Baureihen
- Entwicklung von besonders kleinen Bauelementen (Informationsquelle: großes Modell)
- Entwicklung von besonders großen Systemen (Informationsquelle: kleines Modell)
- Veränderung von Einflussgrößen bei gleicher Größe von Modell und Hauptausführung<sup>101</sup>

---

<sup>92</sup> Aus CONRAD ET AL. 1977, S. 82.

<sup>93</sup> Vgl. STICHLMAIR 1990, S. 173.

<sup>94</sup> Vgl. SPURK 1992, S. 63 f.

<sup>95</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 830 ff. bzw. PAHL und BEITZ 1974b, S. 113 ff.

<sup>96</sup> Vgl. SPURK 1992, S. 63 f.

<sup>97</sup> Vgl. BRIDGMAN 1963, S. 82.

<sup>98</sup> Vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 4 ff.

<sup>99</sup> Vgl. CONRAD ET AL. 1977, 81 f.

<sup>100</sup> Aus CONRAD ET AL. 1977, S. 81 f.

<sup>101</sup> Dieses Ziel wird ebenfalls von der in Abschnitt 5 vorgestellten Entwicklungsmethodik unterstützt, die Anwendung findet sich in Kapitel 8.1, bei der Skalierung der Drehzahl eines Getriebes mit dem Ziel möglichst unveränderter Geometrie.



Dabei ist geometrische Ähnlichkeit nicht per se vorausgesetzt, über den Pi-Raum lassen sich einem Zustandspunkt unendlich viele, auch geometrisch unterschiedliche, Realisierungen des Systems zuordnen; nicht unmittelbar vollständig ähnlich abbildbare Vorgänge<sup>102</sup> lassen sich durch mehrere geeignete (Teil-)Modelle erfassen und skalieren.<sup>103</sup>

Die Skalierung von Modellen wird vornehmlich mit der Dimensionsanalyse durchgeführt, aus relevanten Einflussgrößen werden dimensionslose Kennzahlen auf Basis der Dimensionshomogenität physikalischer Relationen abgeleitet; das Vorgehen basiert auf dem GAUSS-Algorithmus und ist in der Literatur extensiv beschrieben.<sup>104</sup> Anwendungen auf physikalische Probleme<sup>105</sup> und maschinenbauliche Anwendungen<sup>106</sup> sind ebenfalls in der Literatur zu finden. Das allgemeine Vorgehen zeigt Abbildung 2.7.

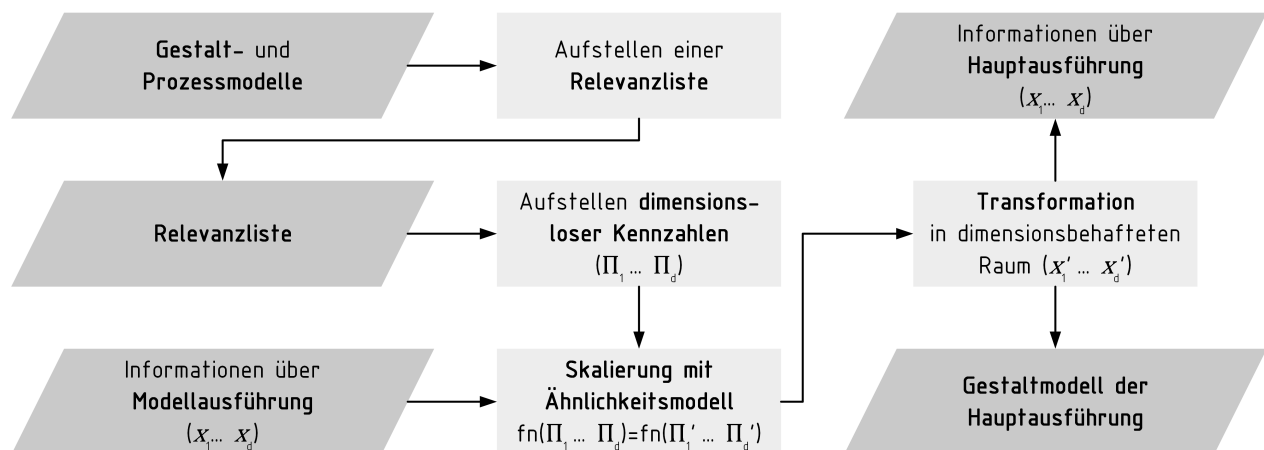
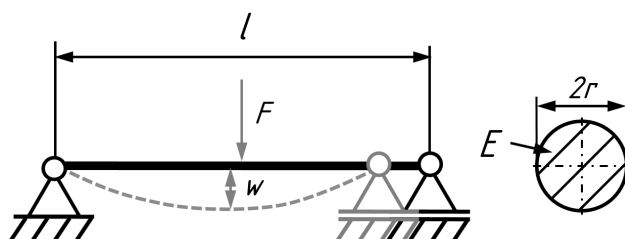


Abbildung 2.7: Vorgehen bei der Skalierung ausgehend von einer Modellausführung mittels Dimensionsanalyse.

Schematisch ist das Vorgehen in der Dimensionsmatrix für ein Biegebalken-Problem in Tabelle 2.3 dargestellt, aus der Dimensionsmatrix  $R$  ergeben sich, durch  $\text{rang}(R) = 2$  der Dimensionsmatrix bei fünf relevanten physikalischen Größen die drei dimensionslosen Kennzahlen des vollständigen minimalen Kennzahlensatzes und die modellspezifische Kennzahl des Problems  $\Pi_j$  (2.12).



	$F$	$E$	$r$	$l$	$w$
<b>L</b>	1	-1	1	1	1
<b>M</b>	1	1	0	0	0
<b>T</b>	-2	-2	0	0	0

Tabelle 2.3: Schematische Darstellung des Balkens und Dimensionsmatrix für einen Biegebalken.

<sup>102</sup> Dies scheitert ausschließlich an der Schwierigkeit, manche stofflichen oder geometrischen Bedingungen zu realisieren, niemals jedoch am Ähnlichkeitsprinzip selbst; da Dimensionshomogenität für jeden physikalischen Effekt gegeben ist, vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 98.

<sup>103</sup> Vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 95.

<sup>104</sup> U.a. vgl. BRIDGMAN 1963, S. 36 ff. SPURK 1992, S. 33 ff. STICHLMAIR 1990, S. 30 ff.

<sup>105</sup> Vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 99 ff. SEDOV 1959, S. 24-34 und STICHLMAIR 1990, S. 82 ff.

<sup>106</sup> Vgl. HERRMANN 1930, S. 360 ff. HILGERT 2005, S. 62 ff. und LEHMANN 1959, S. 470 ff.

$$\Pi_1 = \frac{F}{El^2}, \quad \Pi_2 = \frac{r}{l}, \quad \Pi_3 = \frac{w}{l} \quad (2.12)$$

$$\Pi_j = \Pi_1^{q_1} \Pi_2^{q_2} \Pi_3^{q_3}$$

Durch Experimente, oder Berücksichtigung axiomatischer Gleichungen (auch Differenzialgleichungen) können die Exponenten  $q_i$  bestimmt werden. Berücksichtigt man, dass das Flächenträgheitsmoment in vierter Potenz vom Radius des Balkens abhängt und relevant für das Problem ist, sowie dass die Absenkung die Zielgröße der Berechnung ist, lassen sich die Exponenten direkt bestimmen, vergleiche Anhang:

$$q_1 = 1, \quad q_2 = -4, \quad q_3 = -1 \quad (2.13)$$

Umgeschrieben lässt sich das Phänomen der Balkenbiegung dann mit Gleichung 2.11 als

$$\frac{w}{l} = \Pi_j \frac{Fl^2}{Er^4} \quad (2.14)$$

schreiben; wobei  $w/l$  als relative Durchbiegung,  $F/El^2$  als relative äußere Kraft (bezogen auf die elastischen Kräfte) und  $r/l$  als Schlankheit des Balkens aufgefasst werden kann. Für den in Tabelle 2.3 dargestellten Fall mittigen Lastangriffs und einer Fest-Los-Lagerung ergibt sich  $\Pi_j$  zu  $12\pi^{-1}$  (beispielsweise durch das Experiment); dieser Wert ist für die Skalierung des Systems nicht relevant, zeigt aber die Möglichkeit, die Gleichung für die Absenkung eines solchen Balkens auch dimensionsanalytisch herleiten zu können.

Je nach Zielsetzung können auch allgemeine Ähnlichkeitsbeziehungen verwendet werden, so ist bei Invarianz der Geometrie die HOOKE'sche Kennzahl ausreichend zur Skalierung des Balkens - sie entspricht  $\Pi_1$  in (2.12), beschreibt die Ähnlichkeit elastischer zu äußeren Kräften und lässt sich neben anderen der Literatur<sup>107</sup> entnehmen.

---

### 2.2.5 Grundlagen der Baureihenentwicklung

---

Im folgenden Unterabschnitt wird die Verwendung dimensionsloser Kennzahlen in der Baureihenentwicklung sowie die Bedeutung der Modelle und Methoden der Baureihenentwicklung wie Stufensprünge, Normzahlreihen und Wachstumsgesetze erläutert. Insbesondere der Umgang mit Halbähnlichkeit im Rahmen der Baureihenentwicklung unterscheidet sich von der unvollständigen Ähnlichkeit in der allgemeinen Skalierung, da die Baureihenentwicklung spezifischere, jedoch immer gleiche Zielsetzungen hinsichtlich der Rationalisierung von Entwicklung und Fertigung verfolgt.

Klassische Definitionen von Baureihen gehen davon aus, dass die Baureihe Produkte gleicher Art und unterschiedlicher Größe umfasst<sup>108</sup>, wobei die „Art“ sich i.d.R. auf die Funktionsgleichheit bezieht<sup>109</sup>, während sich die „Größe“ oft, aber nicht immer auf die geometrischen Abmessungen bezieht (vgl. Klassifizierungen von Baureihen, S. 24). Dies wird durch die Verwendung möglichst

---

<sup>107</sup> Vgl. PAHL und BEITZ 1974a, S. 72, PAWLOWSKI 1971, S. 16 und STICHLMAIR 1990, S. 33 f.

<sup>108</sup> Vgl. KLOBERDANZ 1991, S. 2

<sup>109</sup> Vgl. PAHL und BEITZ 1974a, S. 71.

gleicher technischer Lösungen und gleicher Fertigungstechnologien erweitert, wobei Abweichungen möglich sind.<sup>110</sup>

Weiterhin treten Baureihen oft in Kombination mit *Baukästen* auf; beispielsweise wenn in einer modular aufgebauten Maschine nur einige Baugruppen skaliert werden.<sup>111</sup>

Die Abgrenzung zwischen Baureihe und Baukasten erfolgt anhand der Funktion; während die Baureihe Funktionsgleichheit voraussetzt, wird beim Baukasten die Funktion variiert.<sup>112</sup>

Werkzeuge zur Baureihenentwicklung sind hinsichtlich der Stufung klassischerweise Normzahlreihen<sup>113</sup>, welche die Kompatibilität einer Baureihe zu genormten Baureihen von z.B. Maschinenelementen sicherstellen, sowie die aus den Ähnlichkeitskennzahlen abgeleiteten Wachstumsgesetze, die durch Verhältniszahlen ( $\varphi_x$ ) ausgedrückt werden:

$$\varphi_x = \frac{x_1}{x_0} \quad (2.15)$$

Ein Wachstumsgesetz für die Kraft, die eine Struktur aus gleichem Werkstoff ( $\varphi_E = 1$  sowie  $\varphi_R = 1$ ) und bei gleicher Ausnutzung ( $\varphi_\sigma = 1$ ) ertragen kann<sup>114</sup>, ergibt sich dann aus der HOOKE-Zahl (3.1):

$$\varphi_F = \varphi_L^2 \quad (2.16)$$

### Klassifizierung von Baureihen und Typengruppen nach Koller

KOLLER differenziert im Gegensatz zu anderen Autoren die Baureihe weiter, indem er verschiedene Arten von Typengruppen zu einer umfassenden Klassifizierung zusammenstellt. Diese Unterteilung deckt ein breiteres Spektrum ab als in anderen Quellen beschrieben und eignet sich für einen erweiterten Betrachtungsrahmen der Baureihenentwicklungsmethodik im Zuge einer systematischen Variantenkonstruktion. Die Flexibilisierung der Baureihenentwicklung für unterschiedlichste Skalierungsziele ist eines der Ziele der in Kapitel 5 vorgestellten Entwicklungsmethodik. Die Unterteilung der Baureihe wird im Folgenden in Anlehnung an KOLLER kurz zusammengefasst<sup>115</sup>:

1. *Größenreihen* beschreiben eine Baureihe, in welcher eine physikalische Größe – mit Ausnahme der als Gestaltparameter separierten Abmessungen des technischen Systems – der Stufung der Baureihe zugrunde liegt; also eine Entwicklung in eine Leistungs-, Geschwindigkeits-, Temperatur- oder weiteren Baureihe (möglich sind alle physikalischen Größen). Größenbaureihen machen i.d.R. eine Abmessungsbaureihe notwendig, da eine Veränderung einer physikalischen Größe bei konstant gehaltener Beanspruchung des Systems in aller Regel auch eine Anpassung der Gestalt bedingt (das Material und seine Eigenschaften gehen im Regelfall in den konstant gehaltenen Konstruktionsparametern der Baureihe auf). In Größenreihen wird üblicherweise die zugrundeliegende physikalische Größe und nicht die geometrische Größe

<sup>110</sup> Vgl. FELDHOSEN und GROTE 2013b, S. 819.

<sup>111</sup> In einem Automobil bspw. Motor, Bremsen und ggf. Getriebe, während die Karosserie, Fahrwerk und Innenausstattung weitestgehend unberührt bleiben.

<sup>112</sup> Vgl. PAHL und BEITZ 1974a, S. 71.

<sup>113</sup> Vgl. DIN 323-2 1974, S. 2 ff. und Zahlenwerte in DIN 323-1 1974, optimierte Verfahren zur Stufung von Baureihen werden auf S. 27 gegeben.

<sup>114</sup> Vorausgesetzt wird mit diesen Bedingungen, dass sich Steifigkeit und Festigkeit nicht mit dem Maßstab ändern, und die Spannungen im Material über die Baureihe hinweg konstant bleiben.

<sup>115</sup> Vgl. KOLLER 1985, S. 116 ff.

nach einer geometrischen Reihe gestuft. Dies erfährt Anwendung im Evaluationsbeispiel, Abschnitt 8.1.

2. *Gestaltbaureihen* werden durch die Gestalt des technischen Systems festgelegt, zugrunde liegen können also Abmessungen, Form, Anzahl, Lage, Reihenfolge oder die Verbindungsstruktur von Gestaltelementen. Gestaltbaureihen werden von KOLLER weiter unterteilt:

- *Abmessungs-, Flächen- und Volumenbaureihen*, welche sich auf Abmessungen<sup>116</sup>, Flächen<sup>117</sup> oder Volumina<sup>118</sup> beziehen. Insbesondere Abmessungsbaureihen sind oft arithmetisch und nicht geometrisch gestuft<sup>119</sup>.
- *Formgruppen*, die sich aus der Form einer Wirkfläche oder ihrer äußeren Erscheinung ableiten. An dieser Stelle müssen gegenüber der Quelle die Form der Wirkkörper und die der Wirkräume als Unterscheidungsmerkmal ergänzt werden.<sup>120</sup> Ein methodisches Vorgehen bei der Variation dieser Merkmale von Elementen wird von ROTH beschrieben.<sup>121</sup>
- Als *Zahlreihen* bezeichnet KOLLER Baureihen, in denen die Anzahl eines Gestaltelements verändert wird, und bei denen diese auch das Ordnungskriterium für die Baureihe bildet. Neben materiellen Elementen<sup>122</sup> kommen auch immaterielle Größen<sup>123</sup> in Frage.
- *Lagegruppen* sind eine Typengruppe mit untergeordneter Bedeutung – sie sind nicht weit verbreitet. Sie sind auch für die Baureihenentwicklung i.S. dieser Arbeit wenig interessant. Variiert wird die Lage von Wirkflächen zueinander, aber bei baureihentypisch gleicher Funktion.<sup>124</sup>
- *Anordnungs- oder Reihenfolgegruppen* fallen tendenziell bereits stärker in den Bereich von modularen Produkten, und haben ansonsten nicht unmittelbar mit Skalierung zu tun – eine Änderung der Reihenfolge entspricht nicht der Skalierung im mathematisch-physikalischen Sinn (vgl. Abschnitt 2.2).

*Diese Kategorien sind nicht als Ordnungskriterien klassischer Baureihen, wohl jedoch als bei der Skalierung variierbare Merkmale in der Synthese von Baureihen, vgl. Abschnitt 7.4 zu verwenden.*

3. *Werkstoff, Oberfläche und Farbe technischer Produkte* können ebenfalls als Ordnungskriterium für eine Baureihe gelten; mit dem Werkstoff können Eigenschaften wie Dichte, Steifigkeit oder Festigkeit, aber auch Wärmeleitfähigkeit, elektrische Eigenschaften etc. verändert werden.

<sup>116</sup> Bspw. Bohrer, Halbzeuge, Kleidung, Bildformate...

<sup>117</sup> Oftmals handelt es sich um Querschnittsflächen von Energie- oder Stoffleitern wie Kabel, Rohre etc.

<sup>118</sup> Klassische Anwendungsfälle sind Druckbehälter, Trinkgefäße und Kochgeschirr.

<sup>119</sup> Vgl. KOLLER 1985, S. 119.

<sup>120</sup> Vgl. ROTH 2000, S. 151.

<sup>121</sup> Vgl. ROTH 2000, S. 166 ff. Variationsmerkmale der Form können bei Flächen z.B. die Kontur (rund, rechteckig, polygonförmig...) und bei Körpern das Volumen (kugelförmig, kubisch, polyedrisch...) sein, Wirkräume werden entsprechend der Modellierung äquivalent modelliert. Eine typische Anwendung ist die Wälzkörperform als Variation des Wirkkörpers in Wälzlagern.

<sup>122</sup> Ein variiertes materielles Element kann z.B. Anzahl der Zylinder bei Baureihen von Verbrennungsmotoren sein.

<sup>123</sup> Die immateriellen Größen nehmen insbesondere Bezug auf mechatronische, elektrische, regelungstechnische und informationstechnische Systeme, ein mögliches immaterielles Gestaltelement kann bspw. die Abtastrate eines Sensors sein.

<sup>124</sup> Bekanntestes Beispiel für eine Lagegruppe dürften verschiedene Ausführungen von Schrauben sein – beispielsweise Schrauben ansonsten gleicher Abmessungen, bei denen beim Kopf entweder ein Innensechskant oder aber ein Außensechskant verwendet wird können zwei Glieder einer Lagegruppe sein.

Oberflächenbeschaffenheiten können ebenfalls auf einige dieser Eigenschaften einwirken und skalieren dementsprechend auch physikalische Größen, ebenso wie die Farbe die Wellenlänge des reflektierten Lichts oder die Albedo skaliert. Die Nutzung dieses Ordnungskriteriums erfolgt meist aus ästhetischen Gründen, was wie im Fall der Anordnungs- und Reihenfolgegruppen keine Skalierung im für diese Arbeit relevanten Sinne darstellt. Werden Werkstoff oder Oberfläche aus technischen Gründen in verschiedene Ausführungen entwickelt, handelt es sich in der i.d.R. um eine Größenreihe und die Variation der vorgenannten Eigenschaften wird nur zum Zweck der Skalierung einer anderen physikalischen Größe durchgeführt.

4. *Qualitätsreihen* sind ein Mittel zur Skalierung der Produktqualität, sie beziehen sich z.B. auf Toleranzfeldbreiten, Lebensdauern, Zuverlässigkeit, Komfort oder das Preis-Leistungs-Verhältnis. KOLLER legt hier ein nicht mehr vollständig zeitgemäßes Verständnis von Qualität zugrunde (vgl. Abschnitt 2.4), die Entwicklung von Qualitätsreihen kann jedoch ebenfalls durch die Entwicklungsmethodik aus Kapitel 5 unterstützt werden.

#### Vorgehen nach Pahl & Beitz

Das Vorgehen in der Baureihenentwicklung nach PAHL & BEITZ ist der Ausgangspunkt dieser Arbeit. Eine detaillierte Analyse einschließlich der Vorstellung des Vorgehensmodells wird in Abschnitt 4.1 erarbeitet. An dieser Stelle soll daher nur darauf verwiesen werden, dass sich dieses klassische Vorgehen die Ähnlichkeitsphysik zu nutze macht, um aus einem bereits vollständig ausgearbeiteten Produkt systematisch neue skalierte Varianten abzuleiten.<sup>125</sup> Das allgemeine Vorgehen der Übertragung der Entwürfe auf andere Maßstäbe basiert auf den Arbeiten von WEBER und HERRMANN<sup>126</sup> und wird auch in Bezug auf mögliche Skalierungshindernisse beschrieben.<sup>127</sup> Die Entwicklungsmethodik wurde im Laufe der Zeit auch um die Betrachtung von Kostenwachstumsgesetzen<sup>128</sup> sowie um die rechnerunterstützte Ableitung skalierten Entwürfe<sup>129</sup> erweitert.

#### Vorgehen nach Simpson et al.

Kern der *Product Platform Concept Exploration Method* (PPCEM) von SIMPSON, MAIER & MISTREE ist die Entwicklung skalierbarer Produktplattformen. Die Autoren wählen einen rechnergestützten, optimierungsbasierten Ansatz, der – offenbar in Ermangelung der Kenntnis der klassischen Baureihenentwicklungsmethodik – als erster systematischer Ansatz zur Entwicklung skalierten Produkte bezeichnet wird.<sup>130</sup> Dabei werden keine auf der Modellwissenschaft basierenden Kennzahlen oder Wachstumsgesetze eingesetzt. Neu ist die systematische parallele Betrachtung von Baureihe und Baukasten, sowie die (bei PPCEM nur knapp eingeführte) Integration von *Robust Design* zur Synthese gut skalierbarer Lösungen.<sup>131</sup> Erstere wird wegen des massiven Umfangs in dieser Arbeit nur kurz angeschnitten, zweiteres bildet als zentrales entwicklungsmethodisches Instrument zur Beherrschung von varianzbedingter Unsicherheit<sup>132</sup> die Grundlage der Synthese von Lösungen auch in dieser Arbeit, vgl. Abschnitt 7.4.

<sup>125</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 820 ff.

<sup>126</sup> HERRMANN 1930 und WEBER 1930

<sup>127</sup> PAHL und BEITZ 1974a sowie PAHL und BEITZ 1974b

<sup>128</sup> MOST 1989 und PAHL und RIEG 1984

<sup>129</sup> KLOBERDANZ 1991.

<sup>130</sup> Vgl. SIMPSON ET AL. 2001, S. 2.

<sup>131</sup> Vgl. SIMPSON ET AL. 2001, S. 3 f. und 6.

<sup>132</sup> Vgl. CHRISTENSEN ET AL. 2012, S. 817. MATHIAS 2016, S. 44 und THORNTON ET AL. 2000, S. 128 f.

Im Vorgehen der PPCEM (vgl. Abbildung 2.8) sind die Marktsegmentierung sowie die Definition der Einflussgrößen und aus der Marktsegmentierung und Plattformstrategie abgeleiteten zulässigen Wertebereiche der Einflussgrößen zentral. Sie bilden die Grundlage für die rechnergestützte Synthese der Spezifikationen auf Basis der Produktmodelle, oder bei sehr hoher Komplexität, Metamodelle.<sup>133</sup>

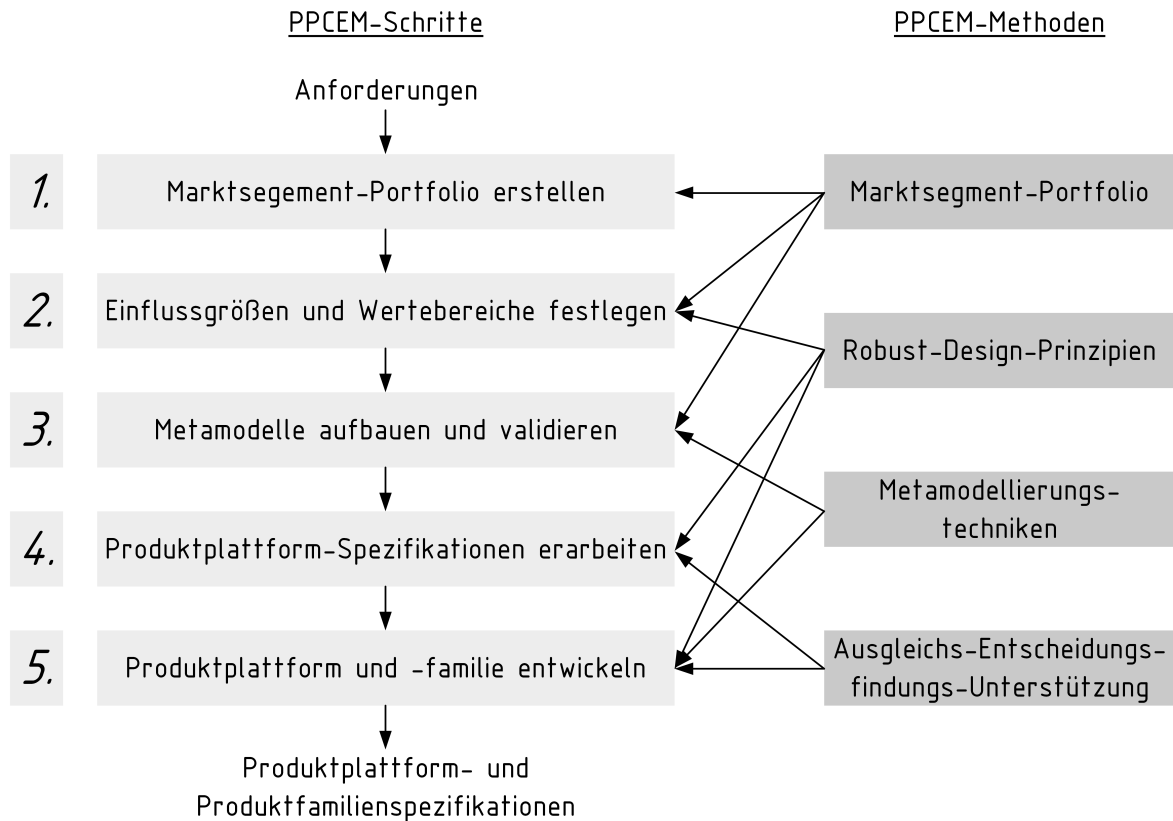


Abbildung 2.8: Vorgehen in der PPCEM. Nach SIMPSON ET AL. 2001, S. 4.

Insgesamt ist die Beschreibung der PPCEM in der Literatur bei guten Ansätzen zur Lösung der von klassischen Methodiken zur Baureihenentwicklung nicht adressierten Problemen sehr wenig konkret, die Ideen von PPCEM fließen jedoch in die in dieser Arbeit entwickelte Methodik mit ein.

### Optimierungsansätze nach Malakov et al.

MALAKOV, ZAHARINOV & TZENOV nehmen sich der Optimierung der Anzahl von Baureihengliedern und deren Platzierung im Skalierungsbereich an. Hierbei wird ohne Bezugnahme der ungünstige Ansatz<sup>134</sup> von EHRENSPIEL zur Festlegung der Baureihenglieder<sup>135</sup> verbessert<sup>136</sup>.

Die Autoren orientieren sich für die Optimierung an einer detaillierten Marktanalyse und einer rechnergestützten mathematischen Optimierung mithilfe von Zielfunktionen, deren Synthese besprochen wird. Dafür wird ein mehrschrittiges Vorgehen dargestellt.<sup>137</sup>

<sup>133</sup> Vgl. SIMPSON ET AL. 2001, S. 4 f.

<sup>134</sup> EHRENSPIEL platziert einen Folgeentwurf hinsichtlich des Wertes des Ordnungsmerkmals, vgl. S. 24, mittig in einem Segment; dabei wird vernachlässigt, dass das Baureihenglied für 50% der in der Planung adressierten Kunden unterdimensioniert ist.

<sup>135</sup> Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 728.

<sup>136</sup> Vgl. MALAKOV ET AL. 2015, S. 794.

<sup>137</sup> Vgl. MALAKOV ET AL. 2015, S. 796 ff.



---

Mathematische Optimierung der Stufung einer Baureihe ist zweifellos eine unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvolle Ergänzung der Baureihenentwicklung. Mit Blick auf den Fokus dieser Arbeit – die Beherrschung von Unsicherheit in der Baureihenentwicklung – lassen sich die für ganze Produktspektren formulierten Zielfunktionen möglicherweise auch auf die Optimierung technischer Probleme übertragen, beispielsweise bei der Ermittlung hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Störgrößeneinfluss besonders geeigneter Parameterkombinationen. Diese Übertragung wird an dieser Stelle jedoch noch nicht durchgeführt.

---

## 2.2.6 Ähnlichkeit, Skalierung und Modelltheorie in anderen Disziplinen

---

Neben den unmittelbar aus dem Ingenieurwesen, vgl. Unterabschnitte 2.2.4 und 2.2.5, bekannten Anwendungen findet die Modelltheorie weitere Anwendungen in verschiedenen Disziplinen. Einige wenige davon sind auch für den Produktentwickler interessant, sie sollen im Folgenden kurz angesprochen werden.

### Wachstumsgesetze und Ähnlichkeit in der Allometrie

Von Bedeutung für die Skalierung von Produkten mit Mensch-Maschine-Schnittstellen oder anderweitiger Interaktion mit Lebewesen sind die Arbeiten von KLEIBER. Hier finden sich eine Reihe von potenziell nützlichen Skalierungsgesetzen: Die Abhängigkeit der Stoffwechselrate von der Masse des Lebewesens folgt einem allgemeingültigen Wachstumsgesetz, bekannt auch als KLEIBER'sches Gesetz<sup>138</sup>, siehe (2.17), woraus ein Wachstumsexponent der relativen Stoffwechselrate  $\varphi_B$  in Abhängigkeit der relativen Körpermasse  $\varphi_W$  von  $3/4$  folgt.

$$\Delta \log B / \Delta \log W = 0,75 \quad (2.17)$$

Dieses Gesetz lässt sich auch zur Skalierung der physiologischen Leistungsfähigkeit von Menschen in technischen Systemen verwenden, so verwenden PELZ & VERGÉ dieses Skalierungsgesetz als Teil der Lösung eines hydrodynamischen Skalierungsproblems, in dem die Leistungsfähigkeit von Ruderern in Abhängigkeit des Körpergewichts skaliert wird.<sup>139</sup> Dabei wird das KLEIBER'sche Gesetz um weitere Ähnlichkeitskennzahlen ergänzt, um ausgehend von einer Referenz-Bootsklasse auf die Geschwindigkeiten anderer Bootsklassen unter ähnlichen Bedingungen zu schließen. Die Anwendung von Methoden der Modelltheorie auf ein gemischt fluiddynamisch-biomechanisches System unter dem Einfluss vieler Störgrößen und großer Varianz, bei der als Ergebnis ein Modell zur verblüffend präzisen Prognose der Geschwindigkeit anderer Bootsklassen herauskommt<sup>140</sup>, zeigt anschaulich die das Große Potenzial der Modellwissenschaft bei der Skalierung axiomatisch anders kaum zu beschreibender Probleme. Mit klassischen axiomatischen Ansätzen ist ein solches System nicht oder nur unter immensem Aufwand zu beschreiben.

*Die Modellwissenschaft erlaubt auch die Betrachtung nichttechnischer Systeme und Vorgänge.*

KLEIBER stellt weiterhin Skalierungsgesetze hinsichtlich des physiologischen Grundumsatzes in Abhängigkeit der Körperfläche<sup>141</sup> oder des Alters<sup>142</sup> auf, zudem befasst er sich mit den Wirkungs-

---

<sup>138</sup> Vgl. KLEIBER 1967, S. 173 f.

<sup>139</sup> vgl. PELZ und VERGÉ 2014, S. 3415.

<sup>140</sup> vgl. PELZ und VERGÉ 2014, S. 3421.

<sup>141</sup> Vgl. KLEIBER 1967, S. 158 f.

<sup>142</sup> Vgl. KLEIBER 1967, S. 184 ff.

---

graden hinsichtlich Muskelarbeit, welche sich in Kombination mit dem Gesetz zum Grundumsatz zum Ableiten von Wachstumsgesetzen für ergonomische Betrachtungen eignet.

Relativmaße für Idealproportionen unterschiedlich großer Menschen finden sich bei McROBERT.<sup>143</sup>

### Skalierung ökologischer Phänomene

Das Hochrechnen vom Modell (oft i.S. einer lokal durchgeführten Untersuchung) auf einen größeren (teils globalen) Maßstab findet auch in verschiedenen Disziplinen der Ökowissenschaften flächendeckend Anwendung. Ein umfassendes Sammelwerk haben WU und LI herausgegeben. In verschiedenen Beiträgen werden die grundlegenden Konzepte der Skalierung und ihre Bedeutung für die Umweltwissenschaften umrissen.<sup>144</sup> Besonders relevant für den Kontext der vorliegenden Arbeit ist der Hinweis, dass Skalierungsmethoden eine Vorhersage des Verhaltens eines übergeordneten Systems erlauben können, ausgehend vom - auf kleineren Skalen - bekannten Verhalten von Teilsystemen.<sup>145</sup>

Weiterhin teilen die Autoren diese auch für die vorliegende Arbeit zentrale Auffassung, vgl. Unterabschnitt 7.3.2, dass für den Einsatz der Skalierungsmodelle besonderes Augenmerk auf deren Grenzen und eventuelle Unstetigkeiten im Skalierungsverhalten gelegt werden muss, um die Antizipation von Systemverhalten zu gewährleisten.<sup>146</sup> Dieser Gedanke fließt in die Methoden zur Bestimmung von Skalierungsgrenzen ein, vgl. Unterabschnitt 7.3.2.

Weitere Elemente, welche – in weiterentwickelter Form – für die Differenzierung von Skalierungsaufgaben in der Entwicklung technischer Systeme relevant sind und in den Kapiteln 5 und 7 zur Zuordnung von Vorgehensschritten und Methoden zu Skalierungsproblemen verwendet werden, sind eine von BIERKENS ET AL. vorgeschlagene Hierarchisierung verschiedener Skalen, vgl. Abbildung 2.9, sowie eine Beschreibung von Dimensionen der Skalierung nach DUNGAN ET AL.<sup>147</sup> Für technische Systeme nutzbar sind nur die Dimensionen der Granularität der Analyse (Skalierung der Elementgröße) sowie die Dimension des Phänomens, gemeint sind hier die Reichweite bzw. Ausdehnung eines Effekts. Diese beiden Dimensionen werden, zusammen mit der hier wenig relevanten Dimension der Sample-Feinheit, in der Analyse der Zusammensetzung flächig ausgedehnter mehrphasiger Strukturen eingesetzt, bspw. beim Bewuchs von Steinen mit unterschiedlichen Flechten. Diese Konzepte beziehen sich nur auf die unmittelbar mit einem betrachteten Phänomen zusammenhängenden Skalen, Unsicherheit i. S. von Kapitel 2.3 nicht beachteter Skalen eines Phänomens kommen im Modell nicht vor. Die Übertragbarkeit des Dimensionenkonzepts erfolgt daher in den späteren Kapiteln auf einer Metaebene, so beispielsweise beim Mapping von Eigenschaften aus verschiedenen Domänen, vgl. Abschnitt 6.5.

### Baureihenentwicklung in der Elektrotechnik

In der Elektrotechnik wird die Baureihenentwicklung vor allem auf elektrische Maschinen angewandt. Die relevanten Arbeiten hierzu wurden von GERHARD verfasst und bieten einen Überblick über Ähnlichkeitskennzahlen für elektrische Maschinen sowie ein mögliches Vorgehen bei

---

<sup>143</sup> vgl. McROBERT 1998, S. 78 f.

<sup>144</sup> Vgl. WU und LI 2006, S. 3ff.

<sup>145</sup> Vgl. WU und LI 2006, S. 11.

<sup>146</sup> Vgl. WU und LI 2006, S. 12.

<sup>147</sup> Vgl. DUNGAN ET AL. 2002, S. 627ff.





---

Unsicherheit ist ein Mangel an Information<sup>156</sup> bzw. das Unmöglichsein einer adäquaten bzw. exakten modellhaften Beschreibung eines Zusammenhangs infolge eines Informationsmangels.<sup>157</sup> Aus diesem Informationsmangel resultiert, dass Modelle (Bilder der Realität) nicht vollständig Deckungsgleich mit den tatsächlich relevanten Zusammenhängen sind; Modelle dienen trotz Unsicherheit jedoch dem Zweck der Beschreibung der Realität.<sup>158</sup> Dies entspricht der Definition, die die DIN 31000 gibt, und welche dieser Arbeit zugrunde liegt:

*„Unsicherheit: Zustand, der sich aus dem gänzlichen oder teilweisen Fehlen von Informationen, Verständnis oder Wissen (...) ergibt.“<sup>159</sup>*

Diese Definition lässt sich um eine Aussage zum Auftreten von Unsicherheit erweitern, welche für das Ableiten von Strategien und Maßnahmen zur Beherrschung der Unsicherheit wichtig ist. Diese Aussage ist zudem die zentrale Arbeitshypothese des SFB 805, vgl. Abschnitt 1.4.

*„Unsicherheit tritt auf, wenn Prozesseigenschaften eines Systems nicht oder nicht vollständig determiniert werden können.“<sup>160</sup>*

Wird Unsicherheit beherrscht, können Robustheit, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit eines Produkts gleichzeitig erhöht werden,. Die Sicherheitsfaktoren können gesenkt werden, Überdimensionierung wird so vermieden.<sup>161</sup>

---

### 2.3.2 Klassifizierung von Unsicherheit

---

Basierend auf verschiedenen Arbeiten (CHOI, HANSELKA & PLATZ, KREYE, KNETSCH, etc.) wird eine Unsicherheitsklassifikation bereitgestellt, die (in erweiterter Form, siehe Abschnitt 3.5) zur Einteilung verschiedener Arten von Unsicherheit in der Baureihenentwicklung herangezogen wird. Diese ist wichtig, da verschiedene Arten von Unsicherheit unterschiedliche Folgen haben und hinsichtlich der Baureihenentwicklung auch mit unterschiedlichen Maßnahmen in den jeweiligen Phasen der Produktentwicklung zur beherrscht werden können. Insbesondere zur Analyse von Unsicherheit sind diese Unterscheidungen relevant und werden in den Analyseschritten in das zu erarbeitende Vorgehen zur Baureihenentwicklung integriert.

#### Epistemische und aleatorische Unsicherheit

In der Literatur wird Unsicherheit, je nach Art ihrer Ursache, oft in zwei Kategorien eingeteilt; *epistemische* und *aleatorische* Unsicherheit.<sup>162</sup> Abbildung 2.10 zeigt diese Unsicherheitskategorien. Die Unterscheidung ist insbesondere in Hinsicht auf ein Verständnis des Produktentwicklungsprozesses als Informationsgewinnungs- und -transformationsprozess nützlich, da sie es erlaubt, unterschiedliche Maßnahmen zur Verringerung der Gesamtunsicherheit in Abhängigkeit vom Fortschritt des Entwicklungsprozesses und des Informationsstands abzuleiten.

*Epistemische Unsicherheit* bezeichnet die Unsicherheit, die aufgrund von *Unwissen* oder *Unge-wissheit* entsteht, Effekte sind nicht bekannt, können nicht (vollständig) beschrieben werden oder die

---

<sup>156</sup> U.A. BERGMAN ET AL. 2009, S. 8. und JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY 2008, S. 5 f.

<sup>157</sup> Vgl. BERTSCHE ET AL. 2009, S. 57.

<sup>158</sup> Vgl. HERTZ 1894, S. 2.

<sup>159</sup> Aus DIN 31000 2017, S. 9.

<sup>160</sup> Vgl. HANSELKA und PLATZ 2010, S. 55.

<sup>161</sup> Vgl. HANSELKA und PLATZ 2010, S. 55 und 59 sowie KNETSCH 2006, S. 1.

<sup>162</sup> Vgl. CHOI 2005, S. 56, ENGELHARDT ET AL. 2010, S. 215 ff. KNETSCH 2006, S. 3, OBERKAMPF ET AL. 2002, S. 336 und THUNISSEN 2005, S. 24 f.

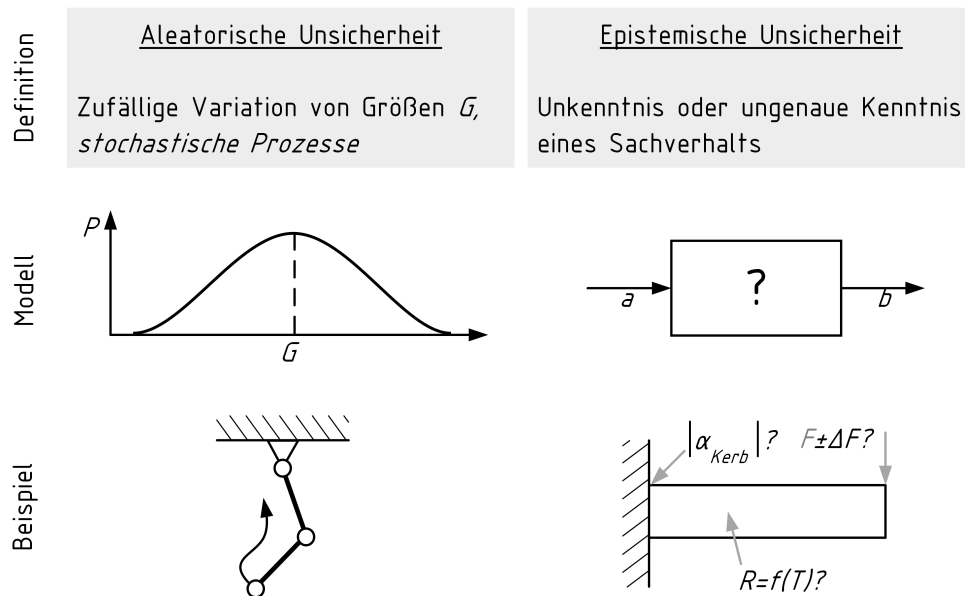


Abbildung 2.10: Aleatorische und epistemische Unsicherheit: Definitionen, Modelle, Beispiele.

Beschreibung ist nicht abgesichert. Diese Art von Unsicherheit korreliert eng mit der Modellunsicherheit und ist für die Skalierung wichtig, da Skalierungsmodelle auf Basis der Ähnlichkeitskennzahlen i.d.R. nur den physikalischen Haupteffekt, nicht jedoch Nebeneffekte beschreiben.<sup>163</sup> Aufgrund epistemischer Unsicherheit liefert das klassische Vorgehen der Skalierung in der Baureihenentwicklung eine unter Umständen zu ungenaue Vorhersage des Produktverhaltens in anderen Baugrößen.

Im Rahmen der Produktentwicklung wird durch die fortschreitende Konkretisierung der Produktmodelle das Wissen über das zu lösende Problem erhöht.<sup>164</sup> Hierdurch wird insbesondere epistemische Unsicherheit reduziert; die Reduktion epistemischer Unsicherheit gilt es zu maximieren.<sup>165</sup> Das Reduzieren epistemischer Unsicherheit ist jedoch nur ein Teil der Beherrschung der Gesamtunsicherheit; selbst bei vollständigem Wissen über einen Sachverhalt bleibt die nicht weiter durch Informationsgewinn reduzierbare aleatorische Unsicherheit bestehen, vgl. Abbildung 2.11.<sup>166</sup>

*Aleatorische Unsicherheit* ist die durch den Zufall bedingte Unsicherheit in technischen Systemen und kann durch *Intervalle*, *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen* oder unscharfe Zahlen (*Fuzzy Numbers*) beschrieben werden.<sup>167</sup> Beispiele hierfür sind z.B. die Schwankung der Nutzerinteraktion mit einem Produkt aufgrund anthropometrischer Variation, aber auch Fertigungstoleranzen oder die Schwankung von Störgrößen.

Aleatorische Unsicherheit kann auf Baureihen besonderen Einfluss haben, z.B. wenn die Schwankung von der Baugröße des Produkts abhängt (größenabhängiger Einfluss der Schwankung), oder sich die Sensitivität des Produkts auf eine konstant bleibende Schwankung je nach Baugröße ändert (größenabhängige Auswirkung der Schwankung). Auch Kombinationen beider Fälle sind

<sup>163</sup> Beispielsweise bei der Vernachlässigung des Einflusses von Eigengewicht auf elastische Verformungen bei der Skalierung nach *Ho*, oder der Einfluss thermischer Dehnungen falls keine thermische Ähnlichkeit gewährleistet ist.

<sup>164</sup> Vgl. ULLMANN 2010, S. 19.

<sup>165</sup> Vgl. KREYE ET AL. 2011, S. 97 und ENGELHARDT 2013, S. 10.

<sup>166</sup> Vgl. KNETSCH 2006, S. 31 f.

<sup>167</sup> Vgl. WIEBEL ET AL. 2011, S. 3.

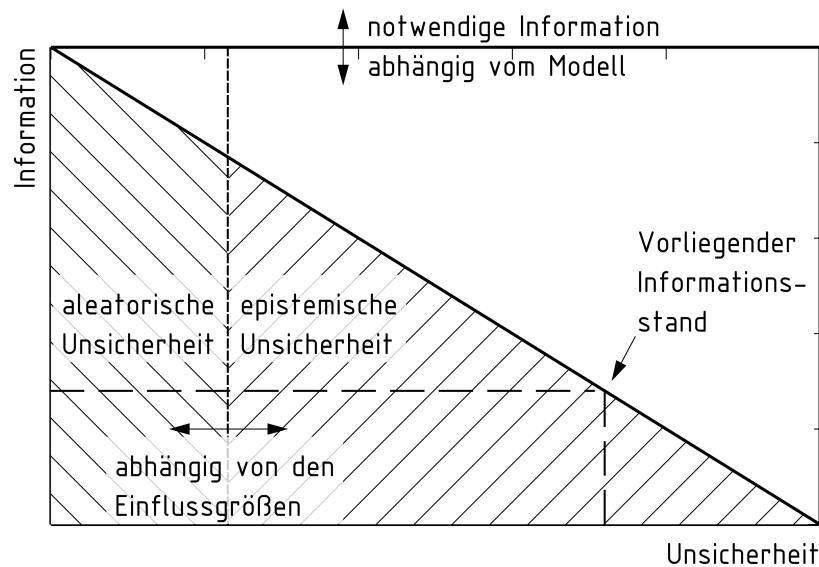


Abbildung 2.11: Zusammenhang zwischen Informationsmenge und Unsicherheit, bezogen auf ein Modell nach KNETSCH 2006, S. 31. Die Darstellung ist als Portfolio zu verstehen.

möglich. Werden größenabhängige Einflüsse und Auswirkungen nicht berücksichtigt, kann sich dies in Abweichungen des tatsächlichen vom geplanten Verhalten bis hin zum Funktionsausfall äußern.

Um aleatorische Unsicherheit zu beherrschen sind weitere Maßnahmen wie z.B. das Verändern von Übertragungsfunktionen hin zu einer Insensitivität gegenüber Schwankungen notwendig, wie sie das Robust Design bietet, vgl. Abschnitt 2.4.

### Klassifizierung anhand des Umfangs verfügbarer Information

Die im vorigen Abschnitt getroffene Unterscheidung zwischen aleatorischer und epistemischer Unsicherheit kann weiter untergliedert werden, vgl. Tabelle 2.4, wenn auf Seiten der epistemischen Unsicherheit der verfügbare Informationsstand detaillierter betrachtet wird. So ist zunächst zu differenzieren, ob bezüglich eines Sachverhalts keinerlei Kenntnis über die Wirkung einer Unsicherheit (Unwissen) oder eine Kenntnis der Wirkung vorliegt. Wenn die Wirkung von Unsicherheit bekannt ist, lässt sich weiter differenzieren ob die Wirkung vollständig oder nur unvollständig quantifiziert werden kann.<sup>168</sup>

Diese Einteilung der Unsicherheit in Kategorien in Abhängigkeit der Quantifizierbarkeit der Auswirkung von Unsicherheit in einem technischen System bietet den Vorteil für unterschiedliche Kategorien von Unsicherheit unterschiedliche Hinweise zur Beherrschung dieser Unsicherheit geben zu können: so ist ein gängiger Weg, Unwissen zu reduzieren, die Informationsbasis zu verbreitern oder die Informationsqualität zu erhöhen. Bei stochastischer Unsicherheit kann eine Beherrschung derselben z.B. durch Robust Design und die Berücksichtigung der stochastischen Schwankungen von Eigenschaften bei der Auslegung von Produkten erfolgen.

### Daten- und Modellunsicherheit

Wird die Unsicherheit im Produktentwicklungsprozess betrachtet, bietet sich eine Differenzierung zwischen der *Datenunsicherheit* und der *Modellunsicherheit* an. Dies ist konsistent zum

<sup>168</sup> Vgl. ENGELHARDT ET AL. 2010, S. 218

Wirkung	bekannt		unbekannt
Quantifizierbarkeit	vollständig quantifiziert	nicht vollständig quantifiziert	nicht quantifiziert
Kategorie	Stochastische Unsicherheit	Ungewissheit	Unwissen
Modelle	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen	Intervalle, Zugehörigkeitsfunktionen	–
Informationsgehalt	sehr hoch	mittel	wenig bis keine Information
Beispiel	normal verteilt mit bekannter Standardabweichung um ihren Nominaldurchmesser schwankender Wellendurchmesser	Bekannte Grenzmaße für einen Wellendurchmesser, unbekannte Verteilung	Temperaturdehnung der Welle, aber unbekannter Betriebstemperatur, keine Information über Varianz der Temperatur

Tabelle 2.4: Wirkungs- und Informationskategorien von Unsicherheit.

Konzept, dass Unsicherheit im Produktentwicklungsprozess aus einem Mangel an Information herrührt.<sup>169</sup> Dabei wird Datenunsicherheit auf nicht determinierte Daten bezogen, beispielsweise durch Unvollständigkeit, Ungenauigkeit und Varianz.<sup>170</sup>

Modellunsicherheit bezieht sich auf die Relationen zwischen den Eigenschaften eines Systems, also die Modellstruktur.<sup>171</sup> Sie ist zu unterscheiden in:

- *konzeptbedingte Modellunsicherheit* und *phänomenologische Unsicherheit*, welche durch einen Mangel an Wissen über die Modellstruktur bedingt ist.<sup>172</sup>
- *Vereinfachung* von Modellen, welche zu Modellunsicherheit führt.<sup>173</sup>
- *mathematische Modellunsicherheit*, auch als „Fehler“ eines mathematischen Modells bezeichnet, bedingt durch Approximation oder Vereinfachung beim Übergang von physikalischem zu mathematischem Modell.<sup>174</sup>
- *Berechnungs(-modell-)unsicherheit*, numerische Abweichungen, welche bei der rechnergestützten Verarbeitung von Modellen auftreten, bspw. durch Rundungsfehler.<sup>175</sup>

Zur Kategorisierung der im Rahmen der Übertragung von physikalischen Modellen hin zu mathematischen Modellen und weiter zur Erstellung von maschinenverarbeitbaren Modellen auftretenden Unsicherheit existiert in großem Umfang Literatur. Ein guter Einstiegspunkt auf

<sup>169</sup> Vgl. EIFLER 2015, S. 18.

<sup>170</sup> Vgl. KREYE ET AL. 2011, S. 4.

<sup>171</sup> Ebenda.

<sup>172</sup> Vgl. KREYE ET AL. 2011, S. 5 und 7, THUNISSEN 2005, S. 77 ff.

<sup>173</sup> Vgl. KREYE ET AL. 2011, S. 5.

<sup>174</sup> Vgl. KREYE ET AL. 2011, S. 5, Vgl. OBERKAMPF ET AL. 2002, S. 336.

<sup>175</sup> Vgl. KREYE ET AL. 2011, S. 5, OBERKAMPF ET AL. 2002, S. 336. und THUNISSEN 2005, S. 68 ff.

diesem für die vorliegende Arbeit aufgrund der Ferne zu epistemischer Unsicherheit nicht weiter beachteten Themas bieten u.A. die Arbeiten von THUNISSEN und OBERKAMPF.<sup>176</sup>

Werden die insbesondere hinsichtlich epistemischer Unsicherheit relevanten Kategorien – solche, in denen der Informationsmangel die dominierende Ursache von Unsicherheit ist – zusammengefasst, ergibt sich das von EIFLER eingeführte Modell von Daten- und Modellunsicherheit, welches den PE-Prozess mit beiden Unsicherheitstypen korreliert, vgl. Abbildung 2.12.

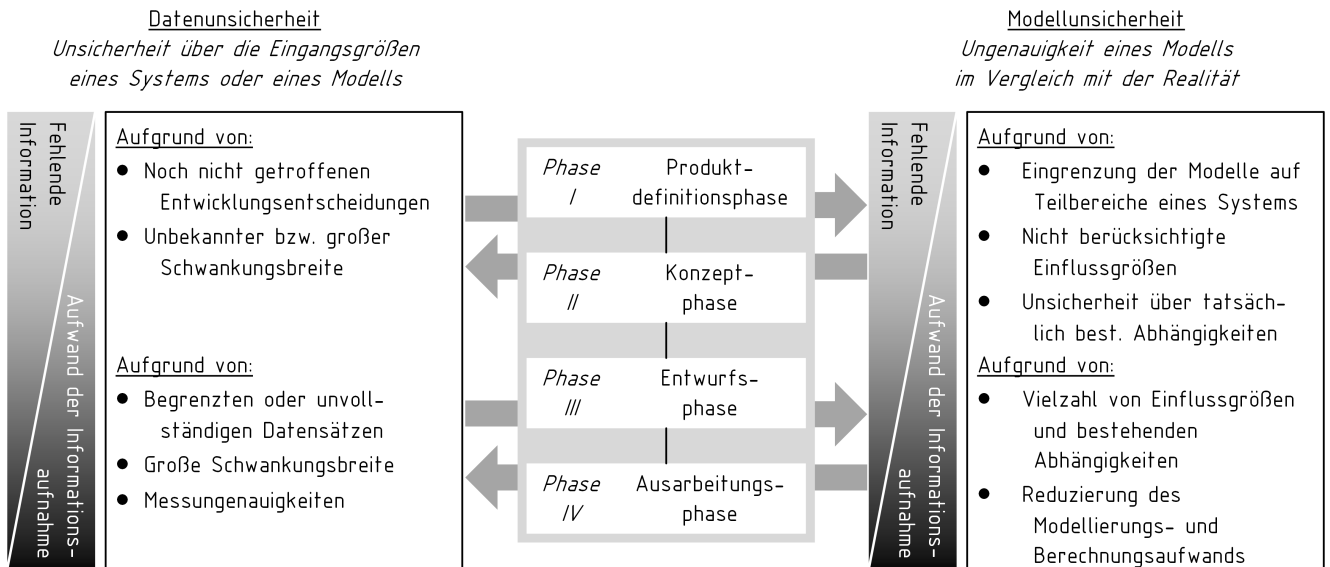


Abbildung 2.12: Unsicherheit in der Produktentwicklung nach EIFLER (2015, S. 19.)

Die Kategorisierung von EIFLER hat mit Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 4.3) einen günstigen Fokus und hebt die für die Baureihenentwicklung relevanten Unsicherheitsformen hervor, sie bildet daher eine der Grundlagen für das zu entwickelnde Skalierungsunsicherheitsmodell, vgl. Abschnitt 3.5.

**Mengentheoretischer Ansatz:** Einen mengentheoretischen Ansatz zur Beschreibung von Modellunsicherheit verfolgen PELZ & HEDRICH (vgl. Abbildung 2.13). Basierend auf der Modelltheorie wird das Modell als Abstraktion der Realität angesehen.<sup>177</sup> Die Modellbildung basiert auf Vernachlässigung als nicht signifikant angesehener Zusammenhänge und Eigenschaften.<sup>178</sup> Dabei werden auch tatsächlich relevante Zusammenhänge und Eigenschaften als insignifikant angesehen und vernachlässigt, während auch irrelevante Ausschnitte der Realität im Modell abgebildet werden. Die Differenz zwischen relevanter Realität und Modell lässt sich als Modellunsicherheit auffassen.<sup>179</sup>

### Endogene und exogene Unsicherheit

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass verschiedene Autoren zwischen *endogener* und *exogener* Unsicherheit unterscheiden. Endogene Unsicherheit ist Unsicherheit, die im Unternehmen entsteht, exogene Unsicherheit entsteht durch äußere Einflüsse.<sup>180</sup> Dieses Begriffspaar wird auch

<sup>176</sup> Vgl. THUNISSEN 2005 und OBERKAMPF ET AL. 2002, letzterer veröffentlichte eine Fülle von Aufsätzen zum Thema mathematischer Modellunsicherheit.

<sup>177</sup> Vgl. HUBKA und EDER 1988, S. 66.

<sup>178</sup> Vgl. HUBKA und EDER 1988, S. 248.

<sup>179</sup> Vgl. HEDRICH ET AL. 2015, S. 59.

<sup>180</sup> Vgl. DE WECK ET AL. 2007, S. 4 ff.

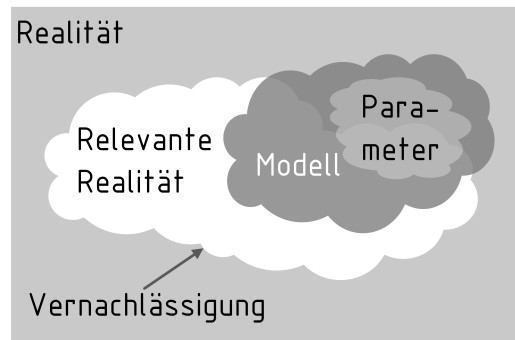


Abbildung 2.13: Auf der Mengenlehre basiertes Unsicherheitsmodell für Modellunsicherheit. Nach HEDRICH ET AL. 2015, S. 59.

der *Kontextunsicherheit* zugeordnet.<sup>181</sup> Diese Kategorien sind auch für die Baureihenentwicklung relevant, jedoch insbesondere im Rahmen des Anforderungsmanagements, der Produktion und Logistik sowie der Betriebswirtschaftslehre – sie werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

### Unsicherheitsmodell

Werden die für diese Arbeit relevanten Kategorien von Unsicherheit zusammengefasst, entsteht in Anlehnung an das bereits zusammenfassende Unsicherheitsmodell des SFB 805<sup>182</sup> ein um die Aspekte der als epistemisch einzuordnenden Teile der Modellunsicherheit erweitertes Modell zur Kategorisierung von Unsicherheit, vgl. Abbildung 2.14. Dieses Modell bildet die Grundlage für die Erarbeitung eines Begriffs der Skalierungsunsicherheit in Kapitel 3.

---

## 2.4 Robust Design

---

Der Begriff des Robust Design ist eng verbunden mit dem Ansatz, Variation zu beherrschen und dadurch Qualität sicherzustellen; dies legen die einschlägigen Werke umfassend dar. Sie gehen davon aus, dass technische Systeme immer varianzbehaftet sind, und dadurch ein vom Ideal abweichendes Verhalten aufweisen, welches einen Qualitätsmangel darstellt.<sup>183</sup> Damit gehen Kosten einher, vgl. Abbildung 2.15, wodurch die Reduktion von Varianz auch in den Fokus der Industrie gerückt ist.<sup>184</sup> Wichtig ist hierbei, dass die Reduktion der Varianz der Zielgröße, also der Eigenschaft, die für den Kunden relevant ist, zentral ist.

Der Zusammenhang zwischen Qualität, den von ihr verursachten Kosten und der Varianz in Produkteigenschaften stellt TAGUCHI her, indem er eine *Quality Loss Function* beschreibt, vgl. Abbildung 2.15, in der die Qualitätskosten  $L$  von der Abweichung einer Produkteigenschaft mit dem Wert  $y$  von ihrem Zielwert  $m$  abhängen.<sup>185</sup> Wichtig ist zudem der Grenzfall der Abweichung  $m \pm \Delta_0$ , bei der das Produkt funktionsuntüchtig wird und die zugeordneten Kosten  $A_0$  entstehen.<sup>186</sup> In der Quality Loss Function, (2.18) beschreibt zudem  $k$  den Skalierungsfaktor der Kosten.

---

<sup>181</sup> Vgl. KREYE ET AL. 2011, S. 3.

<sup>182</sup> Vgl. ENGELHARDT ET AL. 2010, S. 218.

<sup>183</sup> Vgl. BERGMAN und ARVIDSSON 2009, S. 3. Vgl. TAGUCHI ET AL. 2005, S. 175.

<sup>184</sup> Vgl. THORNTON ET AL. 2000, S. 127. Anwendung des Robust Design auf mehrere Industrieprojekte in CHRISTENSEN 2015.

<sup>185</sup> Vgl. TAGUCHI ET AL. 2005, S. 174.

<sup>186</sup> Ebenda.



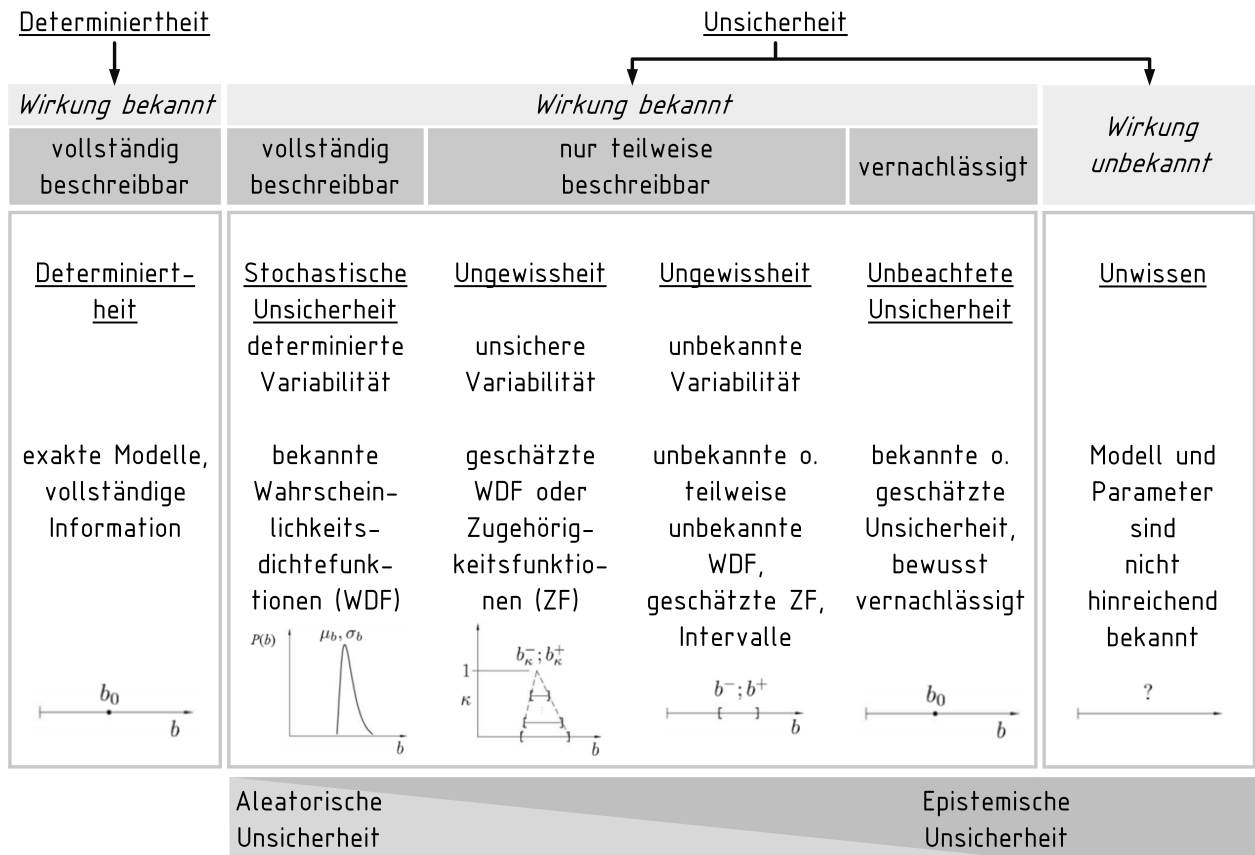


Abbildung 2.14: Aus dem Unsicherheitsmodell des SFB 805 abgeleitetes Unsicherheitsmodell.

$$L = k(y - m)^2, \quad (2.18)$$

wobei sich  $k$  ergibt zu

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2}. \quad (2.19)$$

Ein Weg hierzu ist zwar z.B. die Reduktion von Varianz in der Fertigung, wie sie vielfach praktiziert wird, eleganter ist es aber oftmals, Lösungen zu suchen, die eine geringere Auswirkung einer unveränderten Varianz zur Folge haben, indem Einfluss oder Auswirkung der Varianz reduziert werden.<sup>187</sup>

Als Beispiel hierfür kann die Vorspannung einer angestellten Wälzlagerung über Federn dienen, vgl. Abbildung 3.1. Je nach dem ob eine Schrauben- oder eine Tellerfeder verwendet wird, hat eine Änderung des Federwegs infolge von Fertigungstoleranzen (z.B. der Länge der Welle) einen mehr oder minder großen Einfluss auf die Vorspannkraft und ihre Varianz, dies ist in Abbildung 2.16 dargestellt. Die Nutzung der Tellerfeder<sup>188</sup> entspricht also einer robusteren Lösung, indem die Auswirkung einer Längenänderung der Welle reduziert wird.

<sup>187</sup> Vgl. MATHIAS ET AL. 2010, S. 4 f.

<sup>188</sup> Sofern ihr Arbeitspunkt im flachen Teil der Federkennlinie liegt. Eine gute Alternative ist eine sehr weiche Schraubenfeder, die über einen entsprechend großen Weg vorgespannt wurde – hier darf der Arbeitspunkt stärker variieren.



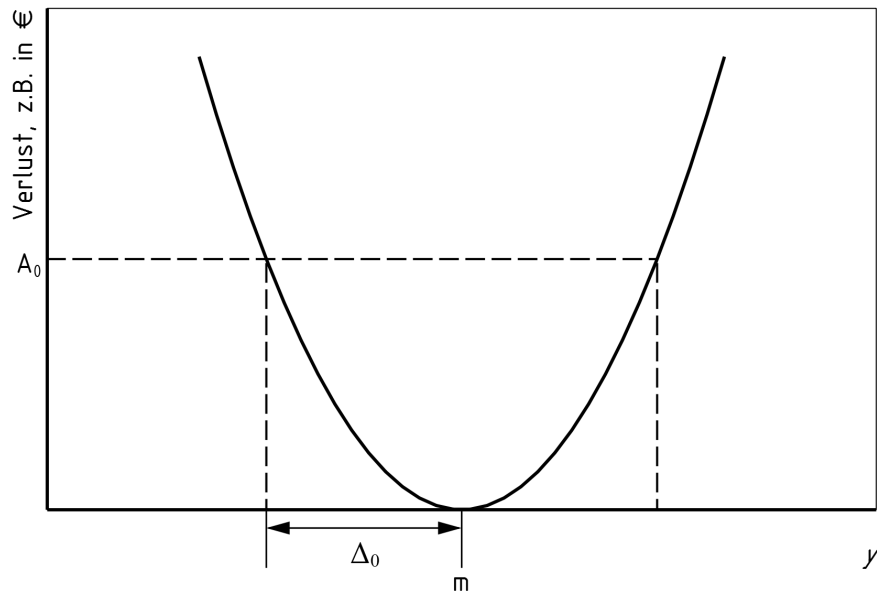


Abbildung 2.15: Quality Loss Function nach TAGUCHI ET AL. 2005, S. 175.

Um Varianz im Produktverhalten zu beherrschen, werden in der Literatur durch verschiedene Methoden (*Variation Risk Management* (VRM)<sup>189</sup>, *Variance Mode and Effects Analysis* (VMEA), *Variation Management Framework* (VMF)<sup>190</sup> sowie das Sicherstellen von Eindeutigkeit in Bezug auf Kinematik, Lagerungen und Kraftflüssen<sup>191</sup> Wege aufgezeigt, wie entweder die zentralen Konstruktionsparameter zur Beherrschung von Varianz identifiziert werden können (VRM, VMEA), oder wie die Auswirkung von Varianz minimiert werden kann (Ansätze zur Eindeutigkeit).

Im Rahmen der Synthese robuster Lösungen werden oftmals Methoden aus dem Bereich des *Design of Experiments* (DoE) und Simulationen eingesetzt.<sup>192</sup>

Eine Verknüpfung des Robust Design mit Methoden der Systemzuverlässigkeit schlagen KEMMLER & BERTSCHE mit dem SMART-Ansatz (Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing) vor. Hier wird ein globales Vorgehensmodell entwickelt, welches die vorgenannten Methoden des Robust Design einbindet und durch Iterativ zu durchlaufende Schleifen mit jeweiligen Designschwerpunkten in den Entwicklungsprozess einordnet.<sup>193</sup>

Die Ansätze des Robust Design können im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert aufgegriffen oder vertieft werden; nichtsdestotrotz bilden insbesondere die genannten Strategien zur Reduktion einer Auswirkung von Varianz die Grundlage für die Entwicklung robust skalierbarer Produkte, vgl. Abschnitt 7.4. Fertigungstoleranzen wachsen i.d.R. nicht proportional zur Bezugsgröße, ihre Auswirkung gilt es im Sinne minimierter Nacharbeit im Entwicklungsprozess also zu verringern (vgl. Kapitel 4), ebenso muss die Verträglichkeit verschiedener Effekte überprüft werden, um über den Skalierungsbereich hinweg das beabsichtigte Verhalten des Produkts sicherzustellen, vgl. Anhang D.

<sup>189</sup> Vgl. THORNTON ET AL. 2000, S. 128.

<sup>190</sup> HOWARD ET AL. 2014, S. 173 ff.

<sup>191</sup> Beispielsweise CHRISTENSEN ET AL. 2012, S. 820 ff. FREUND ET AL. 2015, S. 114 ff. FREUND ET AL. 2016, S. 196 ff. und GÖHLER ET AL. 2016, S. 107 ff.

<sup>192</sup> Vgl. MATHIAS 2016, S. 17 ff.

<sup>193</sup> Vgl. KEMMLER und BERTSCHE 2014, S. 111 ff.

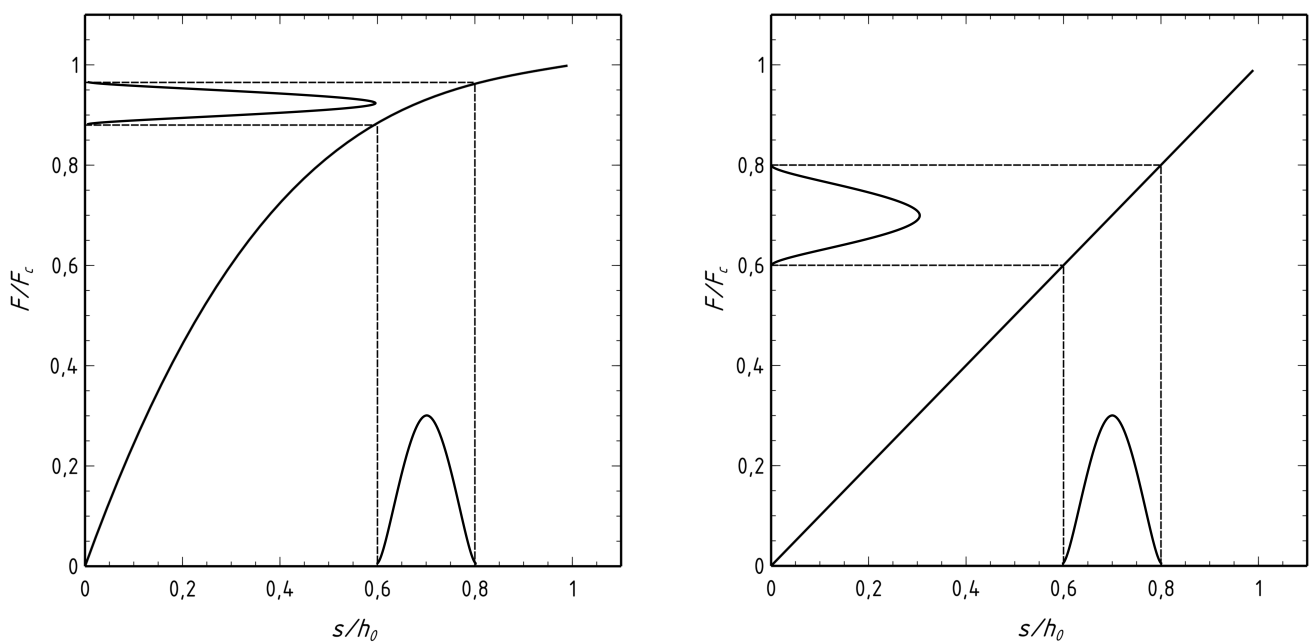


Abbildung 2.16: Robustheit am Beispiel zweier Federkennlinien (Tellerfeder links und Schraubenfeder rechts); gleiche Varianz des Federwegs führt zu unterschiedlicher Varianz der Federkraft. Die Tellerfeder reagiert – bei günstig gewähltem Betriebspunkt – robuster auf eine Schwankung des Federwegs, es folgt eine geringere relative Federkraftschwankung.

---

### 3 Das Konzept der Skalierungsunsicherheit

---

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über das Konzept der Skalierungsunsicherheit. Dieses Konzept entsteht aus der Synthese der etablierten Modelle und Begriffe aus der Modelltheorie und der Baureihenentwicklung, vgl. Abschnitt 2.2, mit den Modellen zur Beschreibung von Unsicherheit aus Abschnitt 2.3. Unsicherheit bezieht sich hier auch auf Modellunsicherheit, welche Produktmodellen, vgl. Abschnitt 2.1, immanent ist<sup>194</sup>.

Die Übertragung des Konzeptes der Unsicherheit auf die Baureihenentwicklung bzw. Skalierungsaufgaben allgemein ermöglicht im Folgenden die Herleitung der Zielsetzung dieser Arbeit sowie der Forschungsfragen, vgl. Abschnitt 4.3.

---

#### 3.1 Manifestation von Skalierungsunsicherheit

---

Das Auftreten von Skalierungsunsicherheit kann sich in diversen Effekten zeigen. Zentraler Punkt ist jedoch immer, dass ein skaliertes technisches System ein anderes Verhalten aufweist als geplant, also die skalierten *Ist-Eigenschaften* des Systems von den skalierten *Soll-Eigenschaften* abweichen. Anschaulich lässt sich dies an einem Beispiel beschreiben, als solches dient ein einstufiges Stirnradgetriebe, vgl. Abbildung 3.1. In den folgenden Kapiteln wird eine genauere Kategorisierung der verschiedenen Unsicherheitsarten, die ein Skalierungsvorhaben beeinträchtigen können, gegeben. Zunächst soll jedoch ein plastisches Verständnis für die möglichen Probleme bei der Skalierung geschaffen werden.

Ein gängiger Ansatz, das übertragbare Moment  $M$  bei Beibehaltung geometrischer Ähnlichkeit und konstanter Werkstoffausnutzung zu skalieren, ist die Skalierung nach der Hooke'schen Ähnlichkeitskennzahl einschließlich des resultierenden Wachstumsgesetzes:

$$Ho = \frac{F}{EL^2} \quad (3.1)$$

Mit der Annahme, dass  $Ho = \text{const.}$  folgt in Stufensprüngen, vgl. Unterabschnitt 2.2.1, geschrieben:

$$\varphi_{Ho} = 1 = \frac{\varphi_F}{\varphi_E \varphi_L^2}, \quad (3.2)$$

was sich mit  $M = F \cdot L$  als Wachstumsgesetz für das Moment schreiben lässt, wobei angenommen werden soll, dass der Werkstoff unverändert bleibt ( $\varphi_E = 1$ ):

$$\varphi_M = \varphi_L^3 \quad (3.3)$$

Ein nach dieser Vorschrift skaliertes Getriebe wird – bei ausreichend großer Spreizung der Baureihe – nicht in allen Größen uneingeschränkt funktionstüchtig bzw. nicht mit konstanter Qualität realisiert sein:

- *Manifestation 1a:* Sehr große Entwürfe können aufgrund der relativ größeren Durchbiegung der Wellen infolge des Eigengewichts von Zahnrad und Welle zu einem verschlechterten Laufverhalten der Verzahnung neigen – die Kräfte infolge Eigengewicht sind vom Volumen abhängig, wachsen also in dritter Potenz, im Gegensatz zu den äußeren Kräften, welche

---

<sup>194</sup> Vgl. RADHAKRISHNAN und MCADAMS 2005, S. 379.

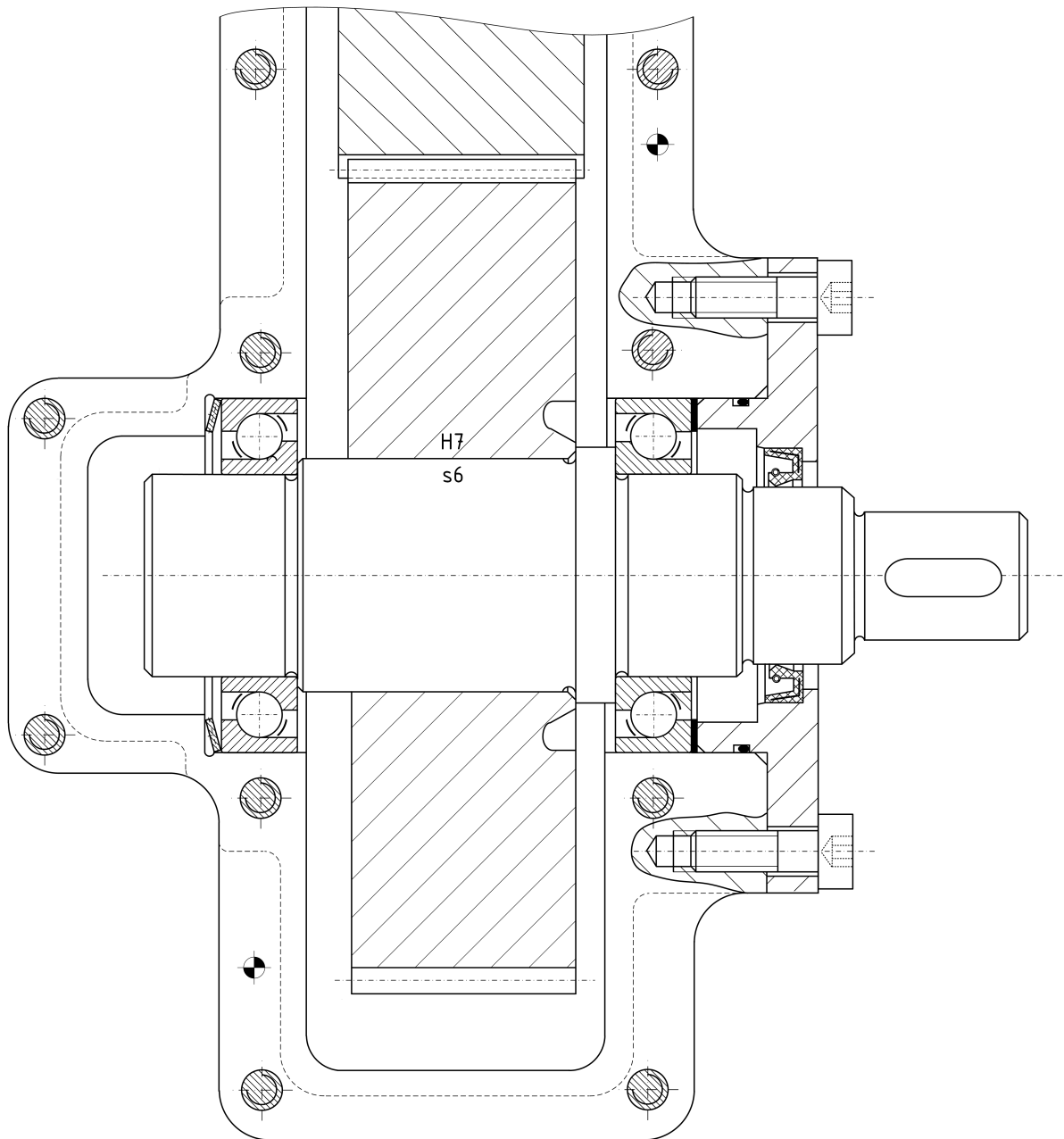


Abbildung 3.1: Getriebestufe als Beispiel für verschiedene bei der Skalierung auftretende Effekte.

entsprechend (3.2) quadratisch skalieren. Das Skalierungsmodell der HOOKE'schen Ähnlichkeit verliert also beim Vergrößern des Systems an dem Punkt seine Gültigkeit, an dem die Ist-Durchbiegung unzulässig von der Soll-Durchbiegung abweicht; hier gilt hinsichtlich des Modells, dass der gewählte Skalierungsfaktor größer dem kritischen Skalierungsfaktor ist ( $\varphi_L \geq \varphi_{L,cr}$ ). Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 3.2 verdeutlicht.

Auch die Werkstofffestigkeit ist, insbesondere bei kleinen Bauteilquerschnitten, nicht als konstant anzunehmen. Durch die statistisch mit der Querschnittsfläche eines Bauteils steigende Fehlstellendichte sinkt die Festigkeit hin zu größeren Entwürfen ab.<sup>195</sup> Gleiches gilt auch für den Umschlag einer Strömung von laminaren in turbulente Verhältnisse; hier steigt der Strömungswiderstand nahezu sprunghaft an.

<sup>195</sup> Vgl. GRIFFITH 1921, S. 180 ff., SCHÜRMANN 2007, S. 22 und DIN 743-2 2012, S. 24.

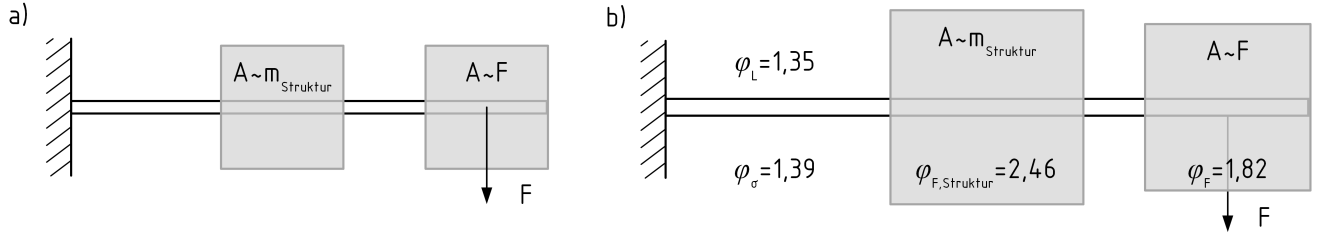


Abbildung 3.2: Eigengewichtseinfluss bei der Skalierung einer Struktur. a) Grundausführung, gleiche Belastung durch Gewichts- und äußere Kräfte. b) Folgeentwurf. Anstelle einer konstanten Spannung ergibt sich bei einer Skalierung nach *Ho* eine Spannungserhöhung um 38% bei einer geometrischen Vergrößerung um 35%.

*Allen diesen Fällen ist gemein, dass der Gültigkeitsbereich des Skalierungsmodells bei der Skalierung verlassen wird.*

- *Manifestation 1b:* Das Beispiel der im Vergleich zu äußeren Kräften überproportional wachsenden Gewichtskräfte zeigt eine weitere Manifestation der Skalierungsunsicherheit: Systeme, bei denen Effekte relativ unterschiedliche Wachstumsexponenten in mindestens einer unabhängigen Eigenschaft erfordern, geraten bei der Skalierung früher oder später an die Grenzen ihrer Funktionsfähigkeit.

Exemplarisch kann hierfür auch die Kühlung des Getriebes herangezogen werden: Überschlüssig betrachtet wächst die übertragbare Leistung quadratisch mit der Drehzahl. Dieser Sachverhalt lässt sich aus der NEWTON-Zahl und (3.3) herleiten:

$$Ne = \frac{F}{\rho \cdot \omega^2 \cdot L^4}. \quad (3.4)$$

Aus dieser folgt, äquivalent zu (3.2) mit  $Ne = \text{const.}$ , also  $\varphi_{Ne} = 1$ :

$$\varphi\omega = \sqrt{\frac{\varphi_F}{\varphi_\rho \cdot \varphi_L^4}}. \quad (3.5)$$

Mit (3.3) folgt dann die CAUCHY-Zahl:

$$Ca = \frac{E}{\rho \cdot \omega^2 \cdot L^2} \quad (3.6)$$

und daraus das Wachstumsgesetz für die Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Baugröße:

$$\varphi\omega = \frac{1}{\varphi_L} \cdot \sqrt{\frac{\varphi_E}{\varphi_\rho}}. \quad (3.7)$$

Einsetzen von  $P = \omega \cdot M$  unter Berücksichtigung von (3.3) ergibt dann die übertragbare Leistung in Abhängigkeit zur Baugröße; gleiches Material lässt den von Steifigkeit und Dichte abhängigen Term den Wert 1 annehmen:

$$\varphi_P = \varphi_L^2 \cdot \sqrt{\frac{\varphi_E}{\varphi_\rho}}. \quad (3.8)$$

In erster Näherung gilt dieses Wachstumsgesetz auch für die Verlustleistung.

Da die entstehende Wärme beim Beispielgetriebe durch Wärmeleitung und Konvektion durch das Gehäuse an die Umgebungsluft abgegeben wird, würde für thermische Ähnlichkeit die Beachtung BIOT'scher Ähnlichkeit notwendig –  $Bi = \text{const}$  – wobei die BIOT-Zahl als

$$Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_s} \quad (3.9)$$

definiert ist.<sup>196</sup> Die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Gehäusematerials wird mit  $\lambda_s$  bezeichnet, während  $\alpha$  den Wärmeübergangskoeffizienten Gehäuse/Luft beschreibt. Beide bleiben in einer Baureihe durch den Einsatz gleichen Materials und gleicher Fertigungsprozesse vorzugsweise<sup>197</sup> konstant. Damit darf für den Erhalt thermischer Ähnlichkeit das Getriebegehäuse nicht geometrisch angepasst werden, was mit der geforderten statischen und dynamischen Ähnlichkeit, (3.1) und (3.4) sowie kombiniert (3.6), kollidiert. *Das aus mechanischen Gründen in seinen Abmessungen zu skalierende Getriebe verliert die thermische Ähnlichkeit, weil letztere nur Selbstähnlichkeit zulässt.*

Dieser Zusammenhang ist bekannt und wird bereits in PAHL und BEITZ 1974b erwähnt, auch weist schon WEBER darauf hin, dass nur eine Anpassung von Stoffwerten eine thermische (oder anderweitige Störnungsvorgänge betreffende) Ähnlichkeit erlaubt.<sup>198</sup>

Wenn zur Beherrschung dieses Effekts nicht entsprechende konstruktive Lösungen, bspw. der Anschluss eines Ölkühlers, ergriffen werden, wird die Temperatur des Getriebes bei größeren Entwürfen in der Folge unzulässig hohe Werte annehmen. Das unterschiedliche Wachstum von abführbarer zu erzeugter Wärmeleistung ist – sofern es nicht in der Entwicklung antizipiert und durch ein Abweichen von geometrischer Ähnlichkeit und/oder dem Prinzip der gleichen Lösung für gleiche Funktionen<sup>199</sup> angeglichen wird – ein Beispiel für die Abweichung der Ist- von der Soll-Eigenschaft für skalierte Getriebeentwürfe. Die Öltemperatur weicht vom geplanten Wert ab. Dieses Phänomen wird noch einmal ausführlicher in Abschnitt 5.1 behandelt.

*Die Skalierungsunsicherheit manifestiert sich also dadurch, dass einfache Skalierungsmodelle bei hinreichend großen Skalierungsfaktoren keine technisch funktionsfähigen Lösungen mehr ergeben.*

- *Manifestation 2:* Die zweite grundsätzlich mögliche Wirkung von Skalierungsunsicherheit ist das Versagen eines Effekts aufgrund einer unzulässigen Skalierung. Wo das Problem eines überproportional wachsenden Eigengewichts noch durch konstruktive Anpassungen umgangen

<sup>196</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 822.

<sup>197</sup> Das Gehäusematerial wird aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur geändert, wenn es technisch notwendig ist. Der Wärmeübergangskoeffizient zur Luft wird von den Umgebungsbedingungen, die über eine Baureihe hinweg oft unverändert sind, und dem Material und der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt. Letztere werden über eine Baureihe ebenfalls aus wirtschaftlichen Gründen nur bei technischen Zwängen verändert.

<sup>198</sup> Vgl. WEBER 1930, S. 299.

<sup>199</sup> Bspw. erzwungene Konvektion anstelle freier Konvektion.

werden kann, vgl. Abbildung 7.10, stellt z.B. eine zu groß skalierte Lösung, die auf dem Kapillareffekt beruht, ein Problem dar. In diesem Fall darf nicht die Querschnittfläche über die Abmessungen des Strömungskanals, sondern nur über die Anzahl der Strömungskanäle skaliert werden, es entsteht eine Zahlbaureihe, vgl. S. 24. Genauso können jedoch auch vormalig hinreichend große Spalte bei der Skalierung hin zum kleineren Entwurf zum Entstehungsherd von Spaltkorrosion werden; beispielsweise im Bereich der Verbindung des Getriebes zu Nachbarbaugruppen.

- *Manifestation 3:* Ferner kann eine zu große Varianz von Eigenschaften bei gewissen Baugrößen auftreten, und damit die Qualität des Produkts unzulässig beeinträchtigen. Dies gilt z.B. für die Verzahnung der Zahnräder mit der Flankenabweichung  $f$ , welche die Abweichung von Soll- zu Ist-Geometrie beschreibt, sowie dem Zahnmodul  $m$ , der die Größe des Zahnes beschreibt.<sup>200</sup>

$$\frac{f_2}{f_1} \cong \sqrt[3]{\frac{m_2}{m_1}} \quad (3.10)$$

Aus dieser Beziehung folgt das Wachstumsgesetz

$$\varphi_{\Delta L} \cong \sqrt[3]{\varphi_L}, \quad (3.11)$$

vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 828.

Dieser Zusammenhang gilt auch für das Wachstum der Toleranz bezogen auf das skalierte Nennmaß einer geometrischen Produktspezifikation bei gleichbleibender Toleranzklasse.<sup>201</sup> Ein Querpressverband wird äquivalent mit abnehmender Größe bei gleicher Toleranzklasse eine größere Varianz des übertragbaren Drehmoments aufweisen, bis zum möglichen Versagen. Wird die Größenabhängigkeit einer Varianz<sup>202</sup> – Mittelwert, Standardabweichung, aber auch die Form der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, vgl. Unterabschnitt 7.3.1 – nicht berücksichtigt, weichen die Ist- von den Soll-Eigenschaften ab. Unter Berücksichtigung von absolut gleichbleibenden Setzbeträgen<sup>203</sup> ergibt sich beispielsweise für den in Anhang B genauer behandelten Querpressverband das in Abbildung 3.3 gezeigte Verhalten.<sup>204</sup>

Es zeigen sich Anhand der Manifestationen von Skalierungsunsicherheit zwei Punkte:

1. *Skalierungsbedingte Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Eigenschaften sind zu erwarten, wenn nicht alle für die Skalierung relevanten Phänomene (Abhängigkeit der qualitativen oder quantitativen Ausprägung von Wirkzusammenhängen oder Varianz vom Maßstab des technischen Systems) in den Skalierungsmodellen berücksichtigt werden. Skalierungsunsicherheit ist demnach auf eine unzureichende oder – bei absichtlicher Vernachlässigung relevanter Effekte – falsch bewertete Informationslage zurückzuführen.*

<sup>200</sup> Vgl. ROTH 2000, S. 271.

<sup>201</sup> Vgl. DIN EN ISO 286-1 2010, S. 25 ff.

<sup>202</sup> Hier kann es sich auch um Zustandsgrößen oder Materialeigenschaften handeln.

<sup>203</sup> Bei gleichen Materialien und gleichen Herstellverfahren werden gleiche Oberflächen erzeugt – bei gleichem Fugendruck stellt sich also über die Baureihe hinweg ein gleichbleibender Setzbetrag ein, der mit zunehmender Baugröße und damit zunehmenden Verformungen zunehmend unwichtiger wird.

<sup>204</sup> Berechnung nach KIRCHNER und BIRKHOFER 2017, S. 228 ff.

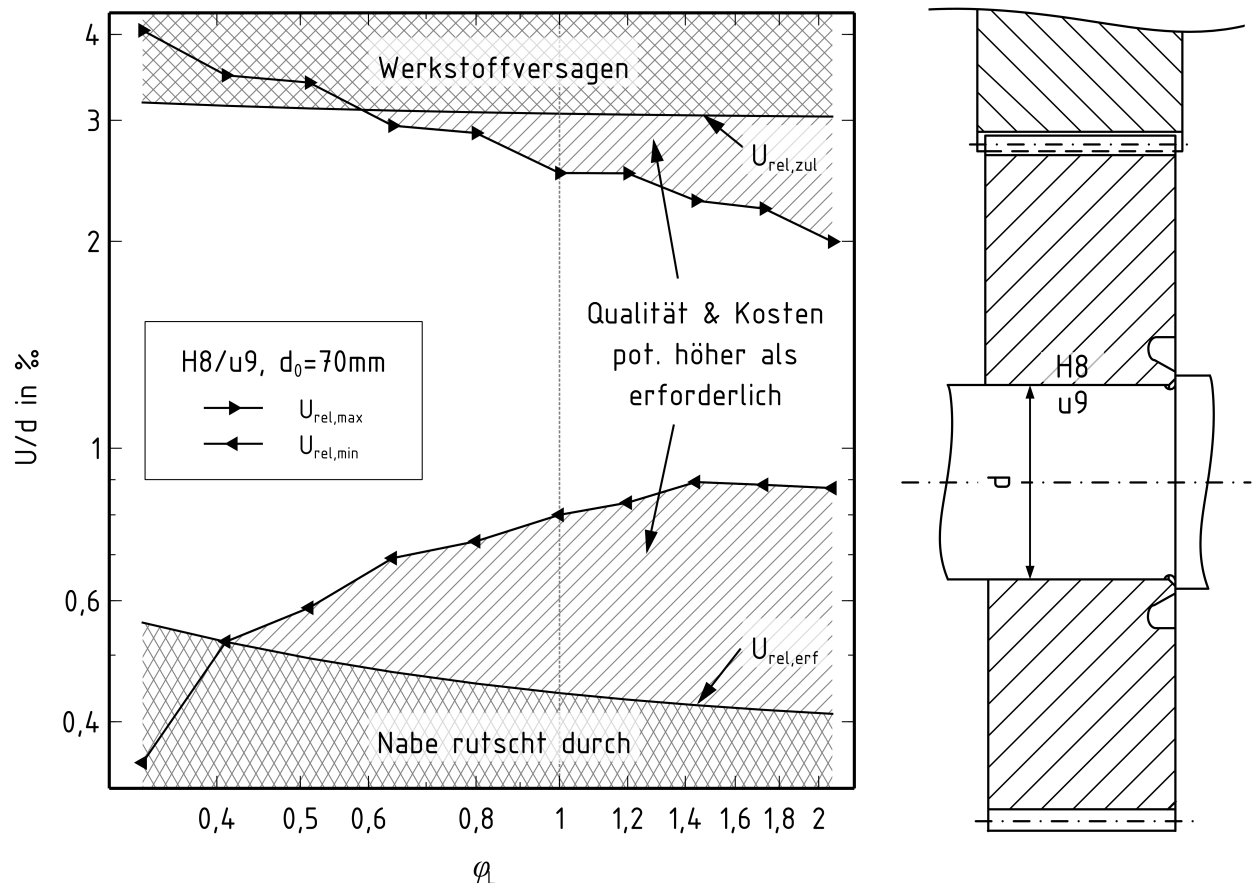


Abbildung 3.3: Verhalten eines Querpressverbandes bei der Skalierung, wenn die Toleranzfeldlage und -breite nicht angepasst wird. Aufgrund dieses Verhaltens werden Passungen in der klassischen Baureihenentwicklung nach der Skalierung angepasst, vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 828.

2. *Erkannte Skalierungsunsicherheit kann durch konstruktive Maßnahmen (bspw. Halbähnlichkeit oder den Einsatz unterschiedlicher Lösungen für verschiedene Maßstäbe) beherrscht werden.*

## 3.2 Der Zusammenhang zwischen der Skalierung technischer Systeme und Prozessen

Wie im vorigen Kapitel gezeigt, ist ein zentrales Problem der Skalierung von technischen Systemen die Bereitstellung einer vollständigen und korrekt bewerteten Informationslage, um auf dieser valide Skalierungsmodelle abzuleiten. Ein Schlüsselement zur Sammlung der für die Reduktion von Unsicherheit relevanten Informationen ist die Analyse technischer Prozesse.<sup>205</sup>

Zum Verständnis der Verknüpfung des Konzepts der Unsicherheit mit dem Konzept der Skalierung ist ein weiterer Zusammenhang von Bedeutung:

*Die Ursache für das Etablieren eines Skalierungsprozesses und damit der Baureihenentwicklung liegt darin begründet, dass ein durch einen technischen Prozess generierter Nutzen hinsichtlich seiner quantitativen Ausprägung verändert werden soll. Die Skalierung ist lediglich das Mittel, um diesen Nutzen möglichst einfach umzusetzen.*

<sup>205</sup> Vgl. KLOBERDANZ ET AL. 2009, S. 2-468, 2-471 ff.



Unter dem Gesichtspunkt kundenorientierter Entwicklungsprozesse ist festzustellen, dass sich kein Kunde, beispielsweise eine Feuerwehr, eine geometrisch vergrößerte Tauchpumpe wünscht, sondern eine größere Förderleistung, ausgedrückt durch einen skalierten Wassermassenstrom  $\dot{M}_W$ . Die Befriedigung dieses Bedürfnisses durch eine Baureihe mit dem Ordnungskriterium „geometrische Länge“ ist lediglich eine hinsichtlich der Rationalisierung von Entwicklungs- und Fertigungsprozessen günstige Lösung, um die höhere Förderleistung zu gewährleisten. Eine alternative Vorgehensweise ist die Erhöhung der zugeführten Leistung, je nach Antriebsprinzip durch eine Erhöhung der eingespritzten Kraftstoffmenge oder des Motorstroms. Es ist nachvollziehbar, dass dies früher oder später zur Überlastung des Systems führt. Auch wird ein zuvor optimiertes System nach dieser Art der Skalierung nicht mehr notwendigerweise eine Lage des Betriebspunkts in einem effizienten Bereich des Verdichterfelds aufweisen.

Die Literatur zur Baureihenentwicklung hingegen zielt lediglich auf Aspekte der Rationalisierung, Qualitäts- und Verfügbarkeitssteigerung ab. Die eigentliche Anforderung, einen Prozess auf einem anderen quantitativen Niveau bereitzustellen, wird aufgrund der vorherrschenden, produktzentrierten Betrachtungsweise bestenfalls implizit berücksichtigt.

Das Konzept der Beherrschung von Unsicherheit in dieser Arbeit<sup>206</sup> beruht jedoch auf einer prozesszentrierten Betrachtungsweise. Denn Unsicherheit tritt in Prozessen auf, sie wirkt sich auch ausschließlich in Prozessen aus.<sup>207</sup> Es lässt sich folgender Schluss formulieren:

*Um Unsicherheit bei der Skalierung technischer Systeme zu beschreiben und zu beherrschen ist es notwendig, die Lebenslaufprozesse des Produkts in den Mittelpunkt zu stellen, da sich dort Unsicherheit manifestiert. Die Skalierung von Eigenschaften des Operators ist lediglich ein Mittel zum Zweck der Skalierung der Wirkgrößen. Durch skalierte Wirkgrößen können Kundennutzen stiftende Prozesse in einem dem Kundenbedürfnis entsprechenden Maßstab realisiert werden. Die Prozessfähigkeit wird durch die Beherrschung der Unsicherheit sichergestellt.*

Aus der stark prozessorientierten Betrachtung der im Entwicklungsprozess zu lösenden Probleme ergibt sich die Möglichkeit, Schwankungen in Eigenschaften, Flussgrößen und Zustandsgrößen zu beschreiben und zu beherrschen. Gegenüber dem Stand der Technik, der sich hinsichtlich der Unsicherheitsbeherrschung in lasttragenden Systemen, vgl. Abschnitt 2.3, auf im Maßstab fixierte Systeme beschränkt<sup>208</sup>, muss diese Betrachtung für zu skalierende Systeme erweitert werden:

*Unsicherheit in technischen Systemen kann sowohl durch vom Maßstab abhängiger Veränderung der Einwirkung, als auch der Auswirkung, ein von Maßstab zu Maßstab unterschiedliches Verhalten des Systems hervorrufen.*

Der Begriff der Skalierungsunsicherheit kann nun wie folgt definiert werden:

*Skalierungsunsicherheit bezeichnet die vom Maßstab des betrachteten Systems abhängige Auswirkung von Unsicherheit, welche sich in der Indeterminiertheit von Eigenschaften und Zustandsgrößen zeigt. Sie kann ihre Ursache sowohl in einem Informationsdefizit hinsichtlich der Determiniertheit der Maßstabsabhängigkeit der Relation zwischen Einwirkung und Auswirkung, als auch hinsichtlich einer vom Maßstab abhängigen Varianz von Systemeigenschaften haben. Die Unsicherheit bezüglich der Relationen zwischen Ein- und Auswirkung kann konkreter als Skalierungsmodellunsicherheit, die Varianz von Eigenschaften in Anlehnung an EIFLER als maßstabsabhängige Datenunsicherheit<sup>209</sup> bezeichnet werden.*

<sup>206</sup> Daraus leiten sich die Modelle in den Abschnitten 6.2, 6.3 und auf S. 107 sowie die Methoden in Abschnitt 7.2 und Unterabschnitt 7.4.2 ab.

<sup>207</sup> Vgl. HANSELKA und PLATZ 2010, S. 55 ff.

<sup>208</sup> Mit Ausnahme der Umweltwissenschaften, vgl. S. 28.

<sup>209</sup> Vgl. EIFLER 2015, S. 19.

---

### 3.3 Skalierung unter Unsicherheit

---

Der Prozess der *Skalierung unter Unsicherheit* bezieht sich auf die bei der Übertragung von Produkteigenschaften oder Informationen von einem auf einen anderen Maßstab entstehende Unsicherheit. Die Unsicherheitsdefinition von HANSELKA & PLATZ (vgl. Abschnitt 2.3), welche besagt, dass Unsicherheit in Prozessen auftritt, und weiterhin durch die Indeterminiertheit von Eigenschaften oder Zustandsgrößen gekennzeichnet ist<sup>210</sup>, lässt sich grundsätzlich auch auf nichttechnische Prozesse übertragen. Dies betrifft auch den Prozess der Skalierung, wie er in der Baureihenentwicklung stattfindet.

Dass der Skalierungsprozess meist keine exakten Ergebnisse liefert, zeigen bereits PAWLOWSKI und SPURK, die sowohl die Möglichkeit der veränderlichen Relevanz von Effekten über den Skalierungsbereich hinweg<sup>211</sup>, das Vorhandensein einer Diskrepanz zwischen Gestalt des Modells und der Hauptausführung, einschließlich daraus resultierender Abweichungen im Verhalten, sog. *Maßstabseffekte*<sup>212</sup>, und die mit stärker von 1 abweichenden Skalierungsfaktor größer werdende Schwierigkeit einer präzisen Informationsübertragung<sup>213</sup>. Die Skalierungsmodelle erlauben u.U. also keine ausreichende Beschreibung des Zusammenhangs, vgl. Unterabschnitt 2.3.2.

An dieser Stelle ist ein Rückbezug auf technische Prozesse möglich; denn der Skalierungsprozess in der Baureihenentwicklung hat die Transformation von Informationen über technische Systeme, äquivalent zum Operanden im Prozessmodell, als Ziel. Der Anfangszustand ist eine Menge an Informationen, die für ein System bestimmten Maßstabs bekannt sind, der Endzustand des Prozesses ist das Vorliegen einer auf den neuen Maßstab transformierte Information.<sup>214</sup> Dies ist im Sinne des Prozessverständnisses nach HEIDEMANN<sup>215</sup> der Zweck des (Skalierungs-)Prozesses. Die Skalierungsmethoden stellen das Arbeitsmittel (Operator) im Skalierungsprozess dar.

Wenn die Eigenschaften der durch Skalierung zu transformierenden Systeme nicht vollständig determiniert sind, wirkt sich diese Unsicherheit im Ausgangssystem<sup>216</sup> auf das Zielsystem<sup>217</sup> aus. Die Indeterminiertheit der Zustandsgrößen und Eigenschaften kann durch unbekannte oder teilweise unbekannte Wirkzusammenhänge im Prozess entstehen, als auch durch Varianz der Eingangsgrößen. Dies entspricht dem Unsicherheitsmodell in Anlehnung an das SFB-805-Unsicherheitsmodell, vgl. Abbildung 2.14.

Daraus folgt: *Ein indeterminiertes System bleibt auch nach der Skalierung indeterminiert*, Unsicherheit wird durch den Skalierungsprozess, sofern keine zusätzlichen Informationen berücksichtigt werden, nicht verringert. In der Regel steigt die Unsicherheit im skalierten System durch Skalierungsmodellunsicherheit sogar.<sup>218</sup>

---

<sup>210</sup> Vgl. HANSELKA und PLATZ 2010, S. 55 ff.

<sup>211</sup> Vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 98.

<sup>212</sup> Vgl. SPURK 1992, S. 63 f.

<sup>213</sup> Vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 98.

<sup>214</sup> In der klassischen Baureihenentwicklung bezieht sich der Ausgangszustand auf das Vorliegen eines Grundentwurfs; der in dieser Arbeit hergeleitete Ansatz zur Baureihenentwicklung fasst dies weiter. Die Informationslage zu Anfang des Skalierungsprozesses kann auch aus einem nicht auf einen Maßstab individualisierten Produktmodell oder einem nicht vollständig ähnliches Referenzprodukt stammen. Die Begründung für diese Erweiterung findet sich in Kapitel 4; die Operationalisierung in den Kapiteln 5, 6 und 7.

<sup>215</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 112.

<sup>216</sup> Gemeint ist bei klassischen Baureihen der Grundentwurf, also das „0“-System, in der Modelltheorie das vom Maßstäblich von der Realität abweichende Modell.

<sup>217</sup> Hier sind bei Baureihen die Folgeentwürfe, also „1“ bis „n“-System bzw. in der Modelltheorie das reale System)

<sup>218</sup> Bildhaft bietet sich der Vergleich mit thermodynamischen Prozessen an; die Entropie eines geschlossenen Systems kann niemals sinken, isentrope (reversible) Prozesse sind unter idealisierten Bedingungen möglich,

Varianz in Zustandsgrößen oder Eigenschaften des Systems, bekannt oder unbekannt, stellt bei der Skalierung noch nicht per se ein Problem dar. Ein geometrisch skaliertes Entwurf, bei dem die Varianz der Gestalteigenschaften in gleichem Maße wächst, wie die zugrundeliegende Gestalteigenschaft, bleibt weiterhin geometrisch ähnlich. Von der Gestalt abhängige Effekte werden auch im skalierten System dieselbe Varianz aufweisen, wie im Ausgangssystem. In diesem Fall stellt die Unsicherheit im System unter dem Aspekt der Skalierbarkeit kein Problem dar. Das skalierte System ist hinsichtlich seines Verhaltens determiniert durch den Unsicherheit berücksichtigenden Eigenschaftsvektor  $\vec{E}'$ , und den Skalierungsfaktor  $\varphi$ , (3.12), zu beschreiben.

$$\vec{E}'_1 = \varphi \vec{E}'_0 \quad (3.12)$$

Anders stellt sich der Sachverhalt dar, wenn Varianz in unterschiedlichem Maße skaliert, als die jeweils zugrundeliegende Eigenschaft. In diesem Fall ist der Unsicherheit berücksichtigende Eigenschaftsvektor abhängig vom Maßstab; damit ändert sich i.A. auch die Varianz der Ausgangsgrößen aus dem Prozess, vgl. (3.13) und Abbildung 5.1.

$$\vec{E}'_1 = \sum_{i=1}^n \Delta_i(\varphi_i) \varphi_i \vec{E}_{0,i} \quad (3.13)$$

Neben Varianz in den Eigenschaften des Operanden und des Operators können, vgl. Abschnitt 3.1, die bei der Skalierung verwendeten Modelle unsicher sein (Skalierungsmodellunsicherheit i.S. von Abbildung 2.12). Eine Skalierung unter Unsicherheit findet immer dann statt, wenn Informationen nicht vollständig oder unsicher sind. Dies kann sowohl bei einem Mangel an Wissen über auftretende Effekte oder dem Mangel an Wissen über die Abbildung der Effekte in einem Modell der Fall sein, als auch wenn die Ausprägung einzelner Parameter nicht bekannt ist.

Eine Definition der Skalierung unter Unsicherheit lässt sich also wie folgt geben:

*Skalierung unter Unsicherheit bezeichnet den Prozess der Skalierung technischer Systeme unter dem Einfluss einer unsicheren Informationslage durch fehlende, nicht vollständige, ungenaue oder nicht verifizierbare Information.*

Die quantitative Auswirkung dieser verschiedenen Typen von Skalierungsunsicherheit auf Wachstumsgesetze lässt sich anhand von Abbildung 3.4 erläutern: Neben dem üblicherweise stark vereinfachten und idealisierten auf einen physikalischen Effekt bezogenen Wachstumsgesetz (hier ist der Einfachheit halber das Wachstum der Zielgröße gleich dem der Eingangsgröße;  $\varphi_{ZG} = \varphi_{EG}$ ) sind eine Varianz und eine Modell- oder Messunsicherheit aufgetragen.

Bezüglich der Varianz ist angedeutet, dass sich diese oft nur in eine Richtung der Skalierung kritisch, in die andere Richtung unkritisch verhält, wie die in Abschnitt 3.1 angesprochenen Fertigungstoleranzen, die unterproportional wachsen. Der Bereich, in dem sich die Ist-Eigenschaften der Ausgangsgröße bewegen, wird in diesem Fall zu kleinen Entwürfen hin relativ gesehen größer, während er zu großen Entwürfen hin relativ gesehen kleiner wird. Dies gilt analog für die Stan-

---

reale Prozesse führen zu einer Erhöhung der Entropie, vgl. STEPHAN ET AL. 2013, S. 150 ff. ebenso wie die Unsicherheit bei der Skalierung nicht idealer Systeme oder bei Verwendung nicht exakter Modelle zunimmt.

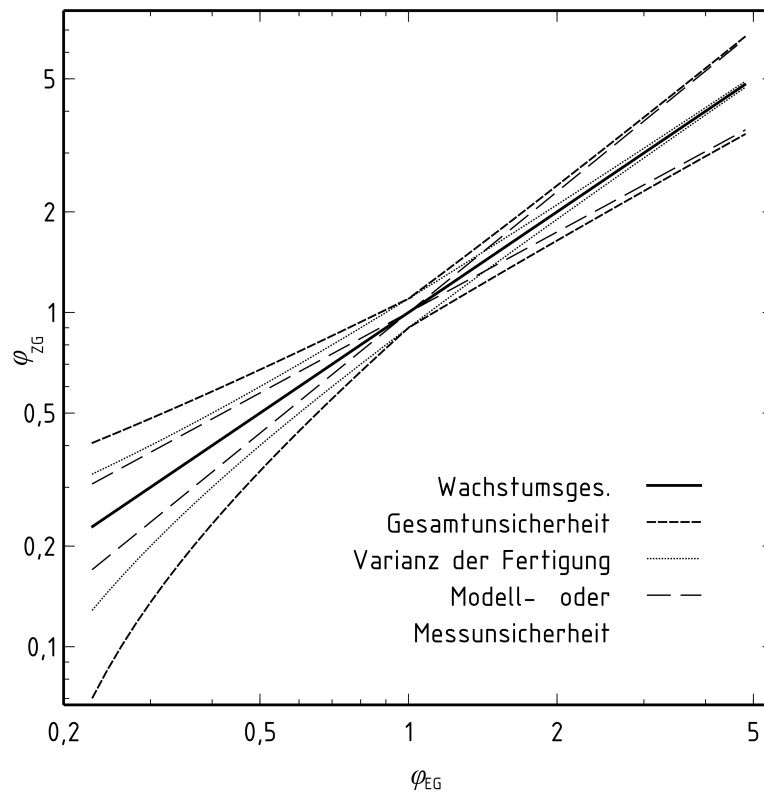


Abbildung 3.4: Die Gesamtskalierungsunsicherheit setzt sich aus Skalierungsunsicherheit verschiedener Ursachen zusammen.

dardabweichung der Ist-Eigenschaft von der Soll-Eigenschaft.<sup>219</sup> Größenabhängige Varianz ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

Die Modellunsicherheit des Skalierungsmodells, sofern es aus einem axiomatischen oder empirischen Produktmodell abgeleitet wurde, ist für den Maßstab, für welchen das Modell erstellt wurde, gewöhnlich sehr klein, wird jedoch mit zunehmender Skalierung größer, und das in beide Richtungen der Skalierung. Dies beruht auf der Annahme, dass mit größerer Entfernung vom Maßstab der Modellerstellung die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten nicht im Modell berücksichtigter Effekte steigt,<sup>220</sup> oder die dem Skalierungsmodell zugrunde liegenden Annahmen nicht mehr gerechtfertigt sind.<sup>221</sup> Dementsprechend ist eine Zunahme der Modellunsicherheit und damit der Differenz zwischen Soll- und Ist-Eigenschaften zu erwarten.

Gleiches gilt für Messunsicherheit; wird von einem gemessenen, physischen Modell aus skaliert, wird die Messunsicherheit äquivalent entsprechend der zugrundeliegenden Bezugsgröße skaliert. Wächst die Varianz nicht proportional zur Bezugsgröße, kommt es zu einem Abweichen der Ist-Eigenschaften von den mit dem Skalierungsmodell berechneten Soll-Eigenschaften.

<sup>219</sup> Grundsätzlich ist auch ein überproportionales Wachstum denkbar, beispielsweise wenn technologische Grenzen überschritten werden, und der Herstellprozess bei weiterer Vergrößerung des Operanden eine relativ größere Varianz erzeugt. Hier ist der größer skalierte Maßstab kritisch. Wieder andere Verfahren, wie generative Fertigungsverfahren, weisen je nach Größe näherungsweise längenunabhängige oder linear längenproportionale Varianz auf, vgl. MEYER 2012.

<sup>220</sup> Vgl. Spaltkorrosion bei Verkleinerung, Instabilität einer Druck belasteten Struktur unter ihrem Eigengewicht bei starker Vergrößerung.

<sup>221</sup> Vernachlässigung der Verformung durch Eigengewicht, gleiche Werkstofffestigkeit für alle Maßstäbe, gleiche Schmierstoffviskosität für alle Maßstäbe bei tatsächlich nicht konstanter Betriebstemperatur.

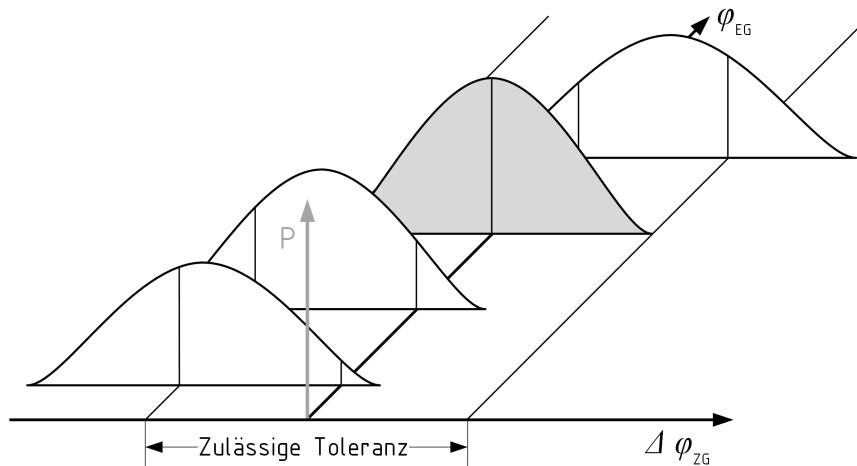


Abbildung 3.5: Maßstabsabhängige Varianz in der Baureihenentwicklung. Die Zielgröße der Skalierung weist eine vom Maßstab des Ordnungskriteriums abhängige Lage des Mittelwerts und der Standardabweichung auf. Dieses Verhalten führt zu Qualitätsverlust der skalierten Entwürfe bis hin zur Funktionsunfähigkeit.

Varianz und Modellunsicherheit verketteten sich, wodurch sich eine Gesamtunsicherheit ergibt. Dies gilt auch für die skalierten Entwürfe, für die Gesamtunsicherheit lässt sich dementsprechend quantitativ ein Wachstumsgesetz ableiten. In der Praxis scheitert dies selbstverständlich daran, dass dem Entwickler nicht vollständig und quantitativ bekannt sein kann, welche Unsicherheit sein Modell aufweist. Für absichtlich unbeachtete Effekte, vgl. Abschnitt 3.5, kann der auf diese Effekte zurückgehende Anteil der Modellunsicherheit fallweise Abgeschätzt werden. Das Unsicherheitswachstumsgesetz für die Gesamtunsicherheit kann je nach Zweck der Abschätzung verschiedene Formen aufweisen, vgl. Unterabschnitt 7.3.1; in Abbildung 3.4 werden exemplarisch Ober- und Untergrenzen aufgetragen.

Die in Abbildung 3.4 dargestellten Wachstumsgesetze und das relative Wachstum der Unsicherheitsquellen zueinander ist lediglich eine mögliche Konstellation, eine Klassifikation relativer Abweichungen zwischen Wachstumsgesetzen ist in Unterabschnitt 7.3.2 angegeben.

Die Relevanz von Skalierungsunsicherheit hebt ebenfalls SPURK, wenngleich weniger differenziert und nicht auf die Entwicklung von Baureihen bezogen, hervor:

*„Die Aussagen der Modelltheorie werden um so schärfer sein, je weniger dimensionslose Produkte im gesuchten Zusammenhang auftreten.“<sup>222</sup>, also je weniger Einflüsse auftreten.*

### 3.4 Skalierung von Unsicherheit

Die Skalierung von Unsicherheit richtet sich an bekannter Varianz von Parametern aus, bezogen auf Abbildung 3.6 sind dies die Bereiche der Ungewissheit und der stochastischen Skalierungsunsicherheit. Die Skalierung von Parameterschwankungen kann mit den Methoden der konventionellen Baureihenentwicklung zwar durchgeführt werden, bisher fehlen jedoch die entsprechenden Modelle bzw. sind diese nicht strukturiert in einen Entwicklungsprozess eingebunden. Die Varianz einzelner Parameter kann, vgl. Abschnitt 3.1, bei der Skalierung des Produktes in anderem Maß als der Parameter selbst wachsen, dies ist zentral für die Sicherstellung der Qualität von Folgeentwürfen.

<sup>222</sup> Aus SPURK 1992, S. 64.

---

Methoden und Modelle zur Skalierung identifizierter Unsicherheit, um zu Aussagen über die Unsicherheit des Verhaltens des skalierten Systems zu erlangen, sind wichtige Werkzeuge um den Entwickler in der Baureihenentwicklung zu unterstützen. Die Berücksichtigung von Unsicherheit und Varianz im Entwicklungsprozess ermöglicht, wie in Kapitel 1.1 angesprochen, die Entwicklung marktgerechterer und umweltverträglicherer Produkte. Ziel der Arbeit in diesem Themenbereich muss sein, die Verwendung der bereits existierenden Modelle in den Produktentwicklungsprozess für Baureihen zu integrieren und dem Nutzen der Modelle zu maximieren, ohne unnötigen Modellierungsaufwand zu generieren.

Ein Ansatz hierzu ist die Verwendung von Unsicherheitswachstumsgesetzen und die Verwendung von Ähnlichkeitskennzahlen zur Skalierung von Unsicherheit, welche in Abschnitt 6.4 und Unterabschnitt 7.3.1 ausgeführt sind.

Skalierung von Unsicherheit wird im weiteren Verlauf der Arbeit wie folgt verstanden:

*Die Skalierung von Unsicherheit bezeichnet die Antizipation der für einen Maßstab bekannten Schwankungen in Produkteigenschaften und Flussgrößen für skalierte Versionen des technischen Systems.*

---

### 3.5 Das Skalierungsunsicherheitsmodell

---

Aus den vorangegangenen Analysen und Definitionen von Aspekten der Skalierungsunsicherheit lässt sich ein Modell zur Kategorisierung von in skalierten technischen Systemen auftretender Unsicherheit, der Skalierungsunsicherheit, ableiten, vgl. Abbildung 3.6. Es basiert auf dem in Unterabschnitt 2.3.2 hergeleiteten allgemeinen Modell zur Kategorisierung von Unsicherheit in technischen Systemen, vgl. Abbildung 2.14.

Die Anpassung erfolgte durch eine Übertragung auf die von der Skalierung betroffene Varianz und die Skalierungsmodelle. Weiterhin wurde das Modell um die Kategorie der Determiniertheit erweitert, wie sie beispielsweise bei vollständiger Ähnlichkeit zwischen zwei Systemen in Hinsicht auf die Determiniertheit der Skalierung vorliegt. Die Kategorie der vernachlässigten, also unbeachteten Unsicherheit wurde ergänzt um eine Kategorie zur Beschreibung der zwar bekannten, aber nicht relevanten Unsicherheit bereitzustellen. Dies geschieht in Rückgriff auf die Unterscheidung in relevante und nicht relevante Realität, vgl. Unterabschnitt 2.3.2, wobei auch Teile der relevanten Realität im Modell bewusst vernachlässigt werden können, um die Komplexität unter Inkaufnahme erhöhter Modellunsicherheit durch Vereinfachung zu reduzieren.<sup>223</sup>

Nach links nimmt die Informationsmenge bis zur Determiniertheit zu, während rechts mit dem Unwissen der Bereich hoher bis vollständiger epistemischer Unsicherheit anschließt. Der Übergang zwischen epistemischer und aleatorischer Unsicherheit ist weiterhin ein fließender; beide Arten von Unsicherheit tragen zur Skalierungsunsicherheit bei; aleatorische Unsicherheit als maßstabsabhängige Varianz von Eigenschaften und Zustandsgrößen des Systems, epistemische Unsicherheit in Bezug auf das Wissen über die Maßstabsabhängigkeit der Relationen zwischen Eigenschaften und Zustandsgrößen. Der Übergangsbereich wird, analog zu den Arbeiten aus dem SFB 805 als Ungewissheit bezeichnet<sup>224</sup>, welche bei bekannten Effekten eine teilweise fehlende, teilweise quantifizierte Information beschreibt,<sup>225</sup> bspw. durch Intervalle oder Zugehörigkeitsfunktionen.<sup>226</sup>

---

<sup>223</sup> Vgl. HEDRICH ET AL. 2015, S. 59.

<sup>224</sup> Vgl. ENGELHARDT ET AL. 2012.

<sup>225</sup> Vgl. ENGELHARDT ET AL. 2012, S. 35.

<sup>226</sup> Vgl. WIEBEL ET AL. 2013, S. 256 ff.



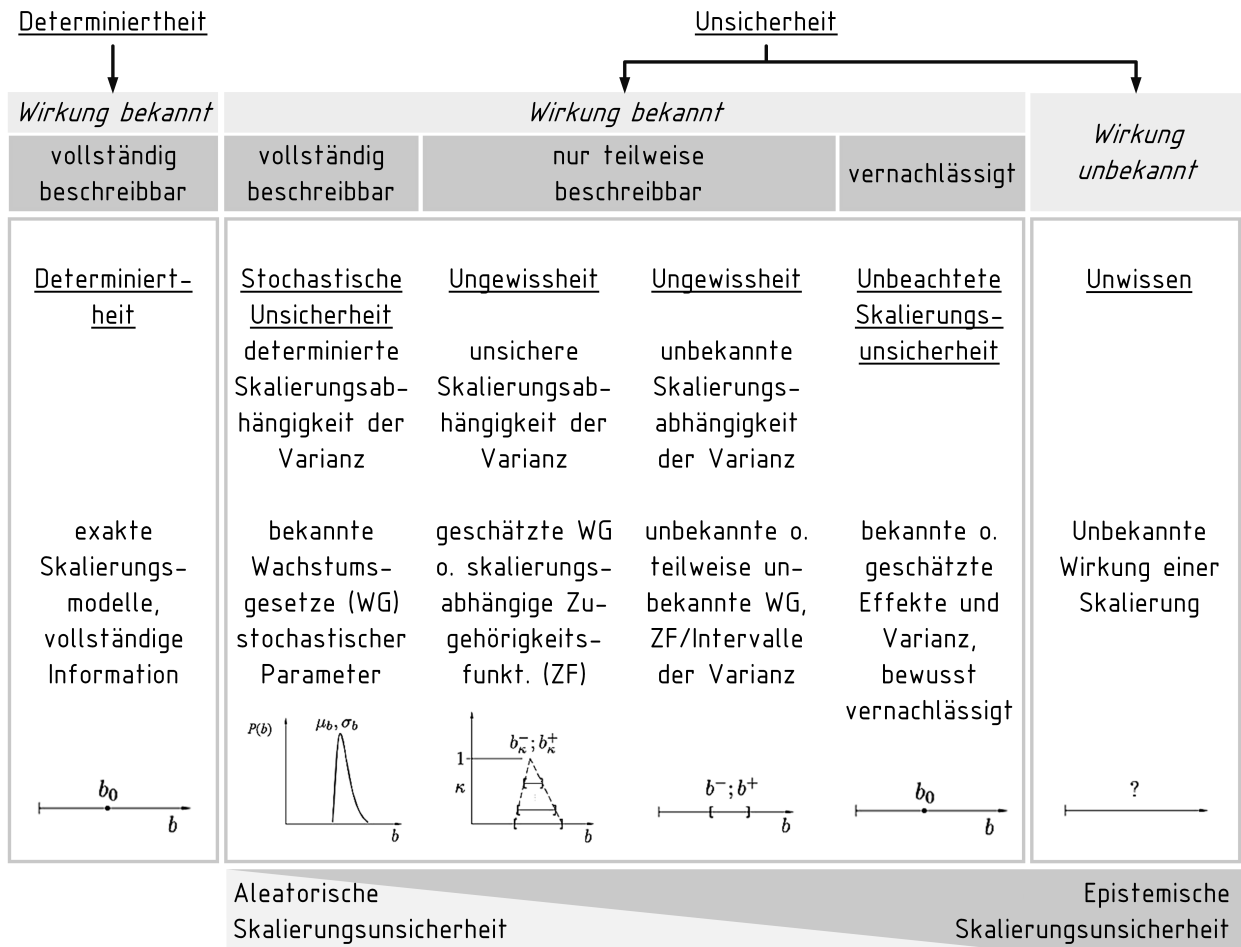


Abbildung 3.6: Unsicherheitsmodell zur Kategorisierung und Darstellung skalierungsrelevanter Unsicherheit.

Die Einteilung der Skalierungsunsicherheit in diese Kategorien ist insbesondere relevant für das Erarbeiten bzw. die Zuordnung von geeigneten Modellen und Methoden zur Beschreibung und Beherrschung von Skalierungsunsicherheit wie sie in den Kapiteln 6 und 7 besprochen werden.

---

## 4 Forschungsbedarf und Zielsetzung

---

Im folgenden Kapitel sollen durch die Analyse Schwachstellen der bereits existierenden Ansätze der Baureihenentwicklung identifiziert werden, vgl. Abschnitt 4.1. Aus diesen Schwachstellen leiten sich Potenziale ab, vgl. Abschnitt 4.3, aus welchen die Zielsetzung einer überarbeiteten Entwicklungsmethodik für Baureihen abgeleitet wird, vgl. Abschnitt 4.3. In Abschnitt 4.4 werden abschließend aus den Zielen die möglichen Forschungsfragen abgeleitet und die im Umfang dieser Arbeit zu beantwortenden Fragen definiert.

---

### 4.1 Analyse der klassischen Baureihenentwicklung

---

Eine Motivation für ein angepasstes Vorgehen in der Baureihenentwicklung ist die Erkenntnis, dass es in praktisch jedem skalierten System Einflüsse gibt – insbesondere die nicht berücksichtigte Skalierungsunsicherheit – die für eine Abweichung zwischen dem geplanten Verhalten des skalierten Systems und dem realen Verhalten des skalierten Systems verantwortlich sind. An welchen Stellen der klassischen Baureihenentwicklung die Beherrschung der Skalierungsunsicherheit verortet ist, soll im Folgenden analysiert werden. Aufgrund ihrer übergeordneten Stellung soll die Baureihenentwicklung in Anlehnung an PAHL & BEITZ betrachtet werden.<sup>227</sup> Auf dem Vorgehen, dargestellt in Abbildung 4.1, baut ein großer Teil der Literatur auf.<sup>228</sup> Das Vorgehen von PAHL & BEITZ beinhaltet das erste im deutschsprachigen Raum dezidiert als Entwicklungsmethodik für den Maschinenbau niedergeschriebene *Vorgehensmodell* zur Entwicklung von Baureihen und basiert auf der klassischen Modellwissenschaft bzw. Ähnlichkeitstheorie<sup>229</sup> und der Baureihenentwicklung in der Konstruktion elektrischer Maschinen<sup>230</sup> und kann daher auf die auch für andere Autoren maßgeblichen Grundlagen zurückgeführt werden.

Das Vorliegen vollständiger Ähnlichkeit ist der einfachste Fall der Baureihenentwicklung; hier lässt sich das Vorgehen nach PAHL & BEITZ unmittelbar und ohne notwendige Iterationen anwenden – leider liegt in der Praxis, wie nahezu alle Autoren explizit hervorheben, nur in den seltensten Fällen eine vollständige Ähnlichkeit zwischen Grundentwurf und Folgeentwurf vor. Tritt der gängige Fall ein, dass von vollständiger Ähnlichkeit abgewichen werden muss, ist die Entwicklung einer *halbähnlichen Baureihe* notwendig, vgl. die Ausführungen zur Halbähnlichkeit auf S. 24.

Ein Teil der Verursacher von Halbähnlichkeit (übergeordnete Ähnlichkeitsgesetze, übergeordnete Aufgabenstellungen wie ergonomische Anforderungen oder übergeordnete wirtschaftliche Forderungen der Fertigung), wird in der Baureihenentwicklung nach PAHL & BEITZ bereits berücksichtigt. Eine zur Beherrschung von Skalierungsunsicherheit sowie zur Erfüllung des vom Kunden beabsichtigten Zwecks hilfreiche prozessuale Betrachtung<sup>231</sup> des skalierten Produkts findet nicht statt. Ebenfalls nicht explizit berücksichtigt werden Störgrößen, die von außerhalb des Systems auf das Arbeitsmittel oder den Prozess einwirken und in unterschiedlichen Skalierungen des Arbeitsmittels unterschiedlich starke Auswirkungen besitzen. Selbes gilt für Nebengrößen zwischen Prozess und Produkt oder zwischen unterschiedlichen Gestaltungszonen/Modulen des Produkts, die nicht explizit analysiert werden. Damit sind die Einflüsse von Skalierungsunsicherheit, die dazu führen können,

---

<sup>227</sup> Vgl. PAHL und BEITZ 1974a und PAHL und BEITZ 1974b.

<sup>228</sup> VIETOR und STECHERT 2013, PAHL und RIEG 1984, MOST 1989, EHRENSPIEL ET AL. 2014, S. 182 ff., KLOBERDANZ 1991 u.v.m., Bezug nehmen auch ROTH 2000, S. 265 ff., DEIMEL 2007, KOLLER 1985, S. 114 ff., LOTZ ET AL. 2016, MALAKOV ET AL. 2015 u.a.

<sup>229</sup> WEBER 1930, LEHMANN 1959 und PAWLOWSKI 1971.

<sup>230</sup> GERHARD 1969 und GERHARD 1969, GERHARD hat den auf der Ähnlichkeitstheorie basierenden Zweig des Elektromaschinenbaus im deutschsprachigen Raum auch mit weiteren Werken, siehe S. 24, stark geprägt.

<sup>231</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 78 ff. und KLOBERDANZ ET AL. 2009, S. 2-467.



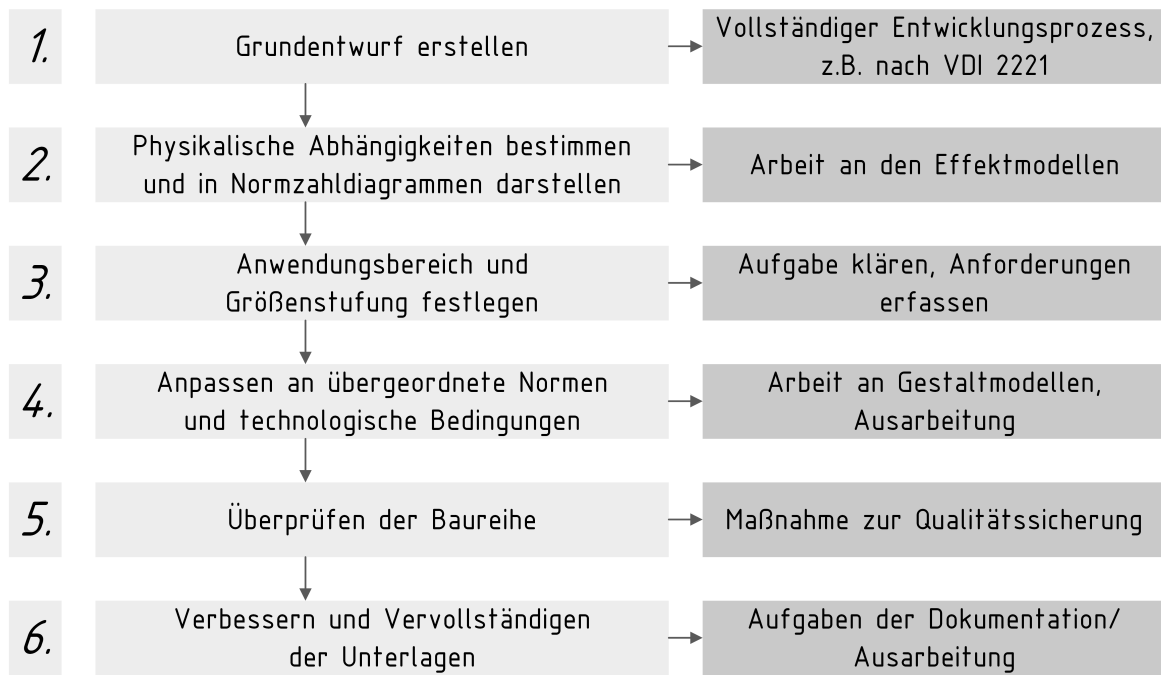


Abbildung 4.1: Klassisches Vorgehen in der Baureihenentwicklung nach PAHL und BEITZ 1974a und Analyse der Tätigkeiten.

dass halbähnliche Anpassungen an der Baureihe vorgenommen werden müssen, nur Bestandteil des Entwicklungsprozesses, wenn ein entsprechend erfahrener Entwickler nicht nur eine vollständige und korrekte Analyse der physikalischen Effekte (Schritt 2 des Vorgehensmodells in Abbildung 4.1) vornimmt, sondern auch aus der Umwelt wirkende Störgrößen sowie alle relevanten Nebengrößen einschließlich der Wirkung auf Produkt und Prozess berücksichtigt.

Gerade die Beurteilung der Wirkung von nicht beabsichtigten Größen auf den Prozess wird, infolge der Fokussierung auf das Produkt den Fähigkeiten des jeweiligen Entwicklers überlassen. Auf das Verhalten des Produktes bei Berücksichtigung ungewollter Effekte wird im klassischen Vorgehensmodell der BRE nicht explizit eingegangen, die Berücksichtigung des Verhaltens skaliert Produkte hängt ebenfalls vom persönlichen Vorgehen des jeweiligen Entwicklers ab.

*Daraus resultiert eine erhöhte epistemische Unsicherheit im Vergleich zu einem Entwicklungsprozess, der strukturiert Informationen über die Maßstabsabhängigkeit der Prozesse des Produktlebenslaufs analysiert, bewertet und die Produkteigenschaften entsprechend beeinflusst.*

PAHL & BEITZ sowie darauf aufbauende Arbeiten sprechen zwar von Funktionsgleichheit<sup>232</sup>, was zu den konstituierenden Elementen einer Baureihe gehört. Der Umstand, dass Halbähnlichkeit häufig auf ein über die Baureihe nichtproportionales Verhalten, vgl. (3.13) zurückgeht, wird auf den mit Beispielen ausgeführten Hinweis, übergeordnete Ähnlichkeitsgesetze zu berücksichtigen<sup>233</sup> reduziert. Dieser Hinweis ist richtig, denn eine Berücksichtigung relevanter Faktoren ist immer besser als die Vernachlässigung derselben. Es werden jedoch keine Methoden oder Modelle zur Identifikation übergeordneter Ähnlichkeitsgesetze und deren Bewertung hinsichtlich Relevanz für den angestrebten Skalierungsbereich gegeben.

<sup>232</sup> Vgl. PAHL und BEITZ 1974a, S. 71 und VIETOR und STECHERT 2013, S. 820.

<sup>233</sup> Vgl. PAHL und BEITZ 1974b, S. 113 f. VIETOR und STECHERT 2013, S. 830 f.

Methodiken wie die Optimierung von Baureihen nach MALAKOV ET AL.<sup>234</sup> und die PPCEM<sup>235</sup>, vgl. Abschnitt 2.2.5, sind in der Lage, als Ergebnis optimierte halbähnliche Baureihen zu liefern. Hierbei werden jeweils die Produkte in Module gegliedert, für jedes Modul wird ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Verhaltens erstellt (hinsichtlich der unsicherheitsminimierten Modellerstellung geben beide Methodiken keine Hinweise). Basierend auf diesen Modellen wird anhand verschiedener Kriterien für eine Baureihe bzw. ein Produkt mit skalierten Modulen (PPCEM) ein optimales Parametersetting der Eingangsparameter ermittelt. Beide Methoden werden ebenfalls auf ein bestehendes Produkt bzw. eine bereits finalisierte Produktarchitektur angewandt. Auch hier gilt analog zur Methodik nach PAHL & BEITZ, dass nur das Verhalten beeinflussende Effekte berücksichtigt werden, die der Entwickler unabhängig von der Methodik antizipieren muss. Liegt hier Unwissen i.S. der Unsicherheitskategorisierung nach Abschnitt 3.5 vor, führt dies bei skalierungsrelevanten Effekten unweigerlich zu einer Abweichung von Soll- und Ist-Eigenschaften der Folgeentwürfe.

Die beschriebenen Schwachstellen weisen auf ein weiteres Problem hin, welches schwerer wiegt als das bloße Fehlen von Analysemethoden, die die Effekte in Prozess und Produkt systematisch auf ihre Skalierbarkeit untersuchen. Durch die Entwicklung eines Grundentwurfs (üblicherweise in einer mittleren Baugröße) wird das Verhalten des Produkts in anderen Größen – kritisch sind oft die Enden des Skalierungsspektrums – in den Syntheseprozessen der Produktentwicklung nicht hinreichend berücksichtigt. Dies wird in der konventionellen Baureihenentwicklung durch eine Überprüfung der skalierten Entwürfe (Schritt 5) und – je nach Notwendigkeit – Iterationsschleifen (zwischen den Schritten 4, 5 und 6), in denen Anpassungen vorgenommen werden, aufgefangen, vgl. Abbildung 4.1. Ein in frühen Phasen der Entwicklung eines Grundentwurfs festgelegtes Konzept mit einer ungünstigen Effektkombination, welche zu mehreren unterschiedlichen Wachstumsexponenten für gleiche Produktmerkmale führt, führt also zu einer großen Anzahl an notwendigen halbähnlichen Anpassungen. Der Grad der Ähnlichkeit zwischen Grund- und Folgeentwurf nimmt dadurch ab, die Rationalisierungsvorteile verringern sich.

Ein weiteres Problem der vorherrschenden Maßgabe, übergeordnete Wachstumsgesetze zu beachten, ist neben der Möglichkeit, dass Unwissen bezüglich der Effekte vorliegt, dass hierbei keine Aussage über die Beschreibbarkeit getroffen wird. Bei der halbähnlichen Anpassung bzw. der mathematischen Optimierung der Baureihen können die relevanten Effekte aber nur dann berücksichtigt werden, wenn sie sich axiomatisch oder empirisch mit einem mathematischen Modell beschreiben lassen. Eine Nutzung qualitativen Wissens in Fällen ohne vorliegendes mathematisches Modell ist nicht vorgesehen.

Abschließend lässt sich in dieser Hinsicht feststellen, dass alle existierenden Vorgehensmodelle auf die Fähigkeiten des Entwicklers vertrauen, Effekte entsprechend ihrer Relevanz in den Skalierungsprozess mit einzubeziehen. Ebenso wird vorausgesetzt, dass sich alle Effekte beschreiben lassen. Das grundsätzlich unvollständige Wissen des Entwicklers, zusammen mit der im Entwicklungsprozess auftretenden, menschenbedingten Unsicherheit (z.B. Vergessen von Einflüssen), führt dazu, dass in der Praxis immer wieder Annahmen falsch getroffen oder Effekte falsch oder nicht modelliert werden, obwohl sie von Relevanz sind.<sup>236</sup>

Wie in Unterabschnitt 2.2.5 eingeführt, wird in der konventionellen Baureihenentwicklung grundsätzlich auf bestehende, bereits vollständig ausgearbeitete Lösungen zurückgegriffen, oder bei den auf Optimierung konzentrierten Methodiken zumindest ein parametrisiertes vollständiges

<sup>234</sup> Vgl. MALAKOV ET AL. 2015.

<sup>235</sup> Vgl. SIMPSON ET AL. 2001.

<sup>236</sup> Beispiele hierzu sind der Evaluation der Ergebnisse dieser Arbeit, Kapitel 8, zu entnehmen.

und ausreichend konkretes Produktmodell vorausgesetzt.<sup>237</sup> Der Beginn des Baureihenentwicklungsprozesses liegt also zeitlich nach der Durchführung einer großen Anzahl von Analyse- und Syntheseprozessen, die zur Entwicklung des Grundentwurfs notwendig waren. Dieser Sachverhalt kann gut in der Produktmodellkonkretisierungspyramide<sup>238</sup> dargestellt werden, siehe Abbildung 4.2.

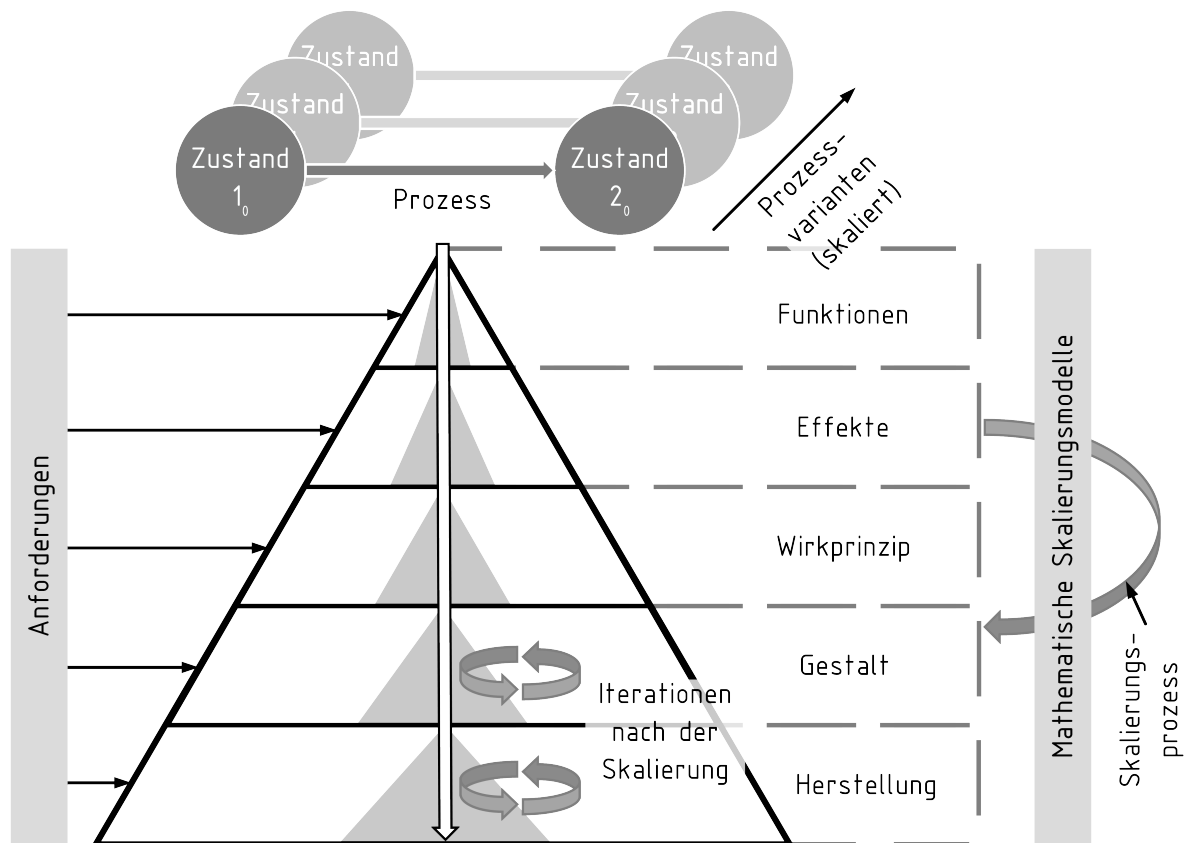


Abbildung 4.2: Darstellung des klassischen Vorgehens der Baureihenentwicklung nach PAHL & BEITZ in der Produktmodellkonkretisierungspyramide.

Die bereits erwähnten Iterationen, mit denen unbeachtete Skalierungsmodellunsicherheit und durch Versuch oder Simulation gefundene Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Eigenschaften reduziert werden – letztlich also auch die Maßnahmen, die die Qualität der skalierten Baureihenglieder sicherstellen – finden bei PAHL & BEITZ also ganz am Ende des Entwicklungsprozesses statt. Dies ist mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden, da mit steigender Produktkonkretisierung eine Änderung am Produkt durch eine größere Anzahl betroffener Merkmale aufwändiger wird, vgl. Abbildung 4.3.

<sup>237</sup> Die bereits existierenden Lösungen können auch aus vorherigen Produktgenerationen übernommen werden, wenn die Skalierung oder teilweise Skalierung als eine Weiterentwicklung einer bestehenden Typenreihe aufgefasst wird. Für das Vorgehen bei der Entwicklung nachfolgender Produktgenerationen steht mit ALBERS ET AL. 2015 und insbesondere (WINTERGERST 2015) Literatur zur Verfügung. Die Produktgenerationenentwicklung nach ALBERS legt keinen Fokus auf die Skalierung von Systemen, während zu große Abweichungen zwischen den Produkten verschiedener Generationen eine Nutzung der Baureihenentwicklung aufgrund fehlender geometrischer Ähnlichkeit zumindest erschweren. Die Nutzung von Wissen über vorherige Produktgenerationen wird in Unterabschnitt 7.4.2 eingehend behandelt.

<sup>238</sup> Weiterentwickelt aus SAUER 2006, S. 68.

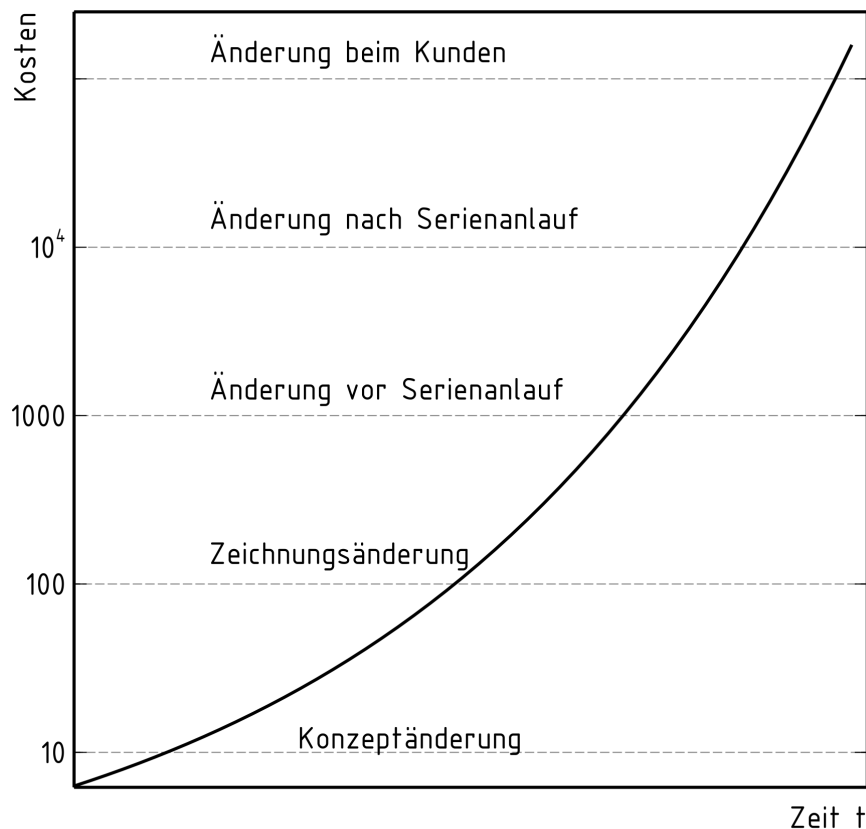


Abbildung 4.3: Die Zehnerregel der Fehlerbehebungskosten. Fehlerkosten wachsen exponentiell, je später der Fehler bemerkt und behoben wird. Nach LINDEMANN 2009, S. 198.

Im Rahmen dieses Vorgehens verketteten sich zudem die aleatorische Skalierungsunsicherheit, die zwar vorliegt, jedoch bisher nicht beachtet wird, und die durch die Arbeit mit stark vereinfachten Effektmodellen in der initialen Skalierung des Grundentwurfs – vor den Iterationen zur halbähnlichen Anpassung – entstehende epistemische Skalierungsunsicherheit. Diese Unsicherheitsverkettung ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

*Der zentrale kritische Punkt, der sowohl das Vorgehen nach PAHL & BEITZ und der damit verwandten Methodiken, als auch die PPCEM und die Optimierungsmethodik nach MALAKOV ET AL. betrifft, ist, dass die Entwicklung eines Grundentwurfs bzw. detaillierten Konzepts nicht durch Modelle oder Methoden unterstützt wird. Diese machen bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung die Anforderungen an die Skalierbarkeit des Produkts transparent und unterstützen den Entwickler damit in der Entwicklung skalierbarer Produkte. Dabei wird dort durch die Wahl der physikalischen Effekte und der Wirkstruktur die Skalierbarkeit des Systems weitgehend festgelegt; Änderungen sind später nur bedingt – im Rahmen einer halbähnlichen Anpassung vorrangig auf Gestaltebene – oder mit hohem Aufwand möglich. Durch die hauptsächlichliche Verwendung von Modellen auf Effektebene – nach Abbildung 4.2 – zur Ableitung der Skalierungsmodelle weisen letztere aufgrund geringer Konkretisierung eine hohe epistemische Unsicherheit auf. Skalierungskritische Auswirkungen maßstabsabhängiger Varianz, also aleatorischer Unsicherheit, vgl. Abbildung 3.5, werden bisher nicht beachtet.<sup>239</sup>*

<sup>239</sup> Zur Illustration lässt sich der Querpressverband (QPV) aus Abbildung 3.3 heranziehen. Die Skalierung auf Ebene der physikalischen Effekte vernachlässigt zunächst nicht geometrisch ähnlich skalierende Gestalteigenschaften

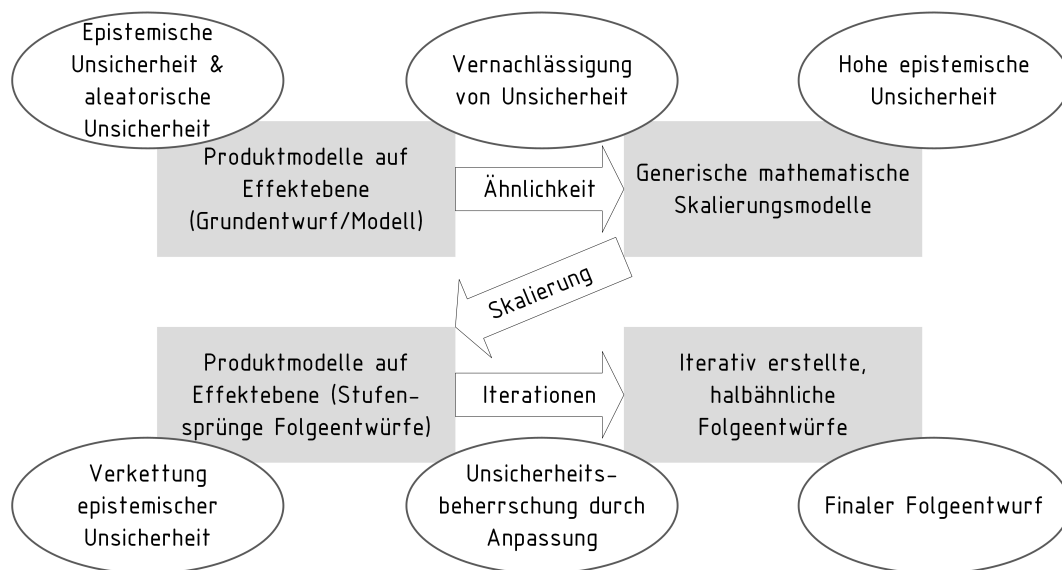


Abbildung 4.4: Unsicherheitsverkettung in der klassischen Baureihenentwicklung. Aleatorische Unsicherheit des Grundentwurfs verkettet sich mit epistemischer Unsicherheit der Skalierungsmodelle, was im Entwicklungsprozess zu spät auftretenden Iterationen mit dem Ziel halbähnlicher Anpassung des Entwurfs führt.

Als Beispiel können hier die Änderungen an der Wirkstruktur bzw. die analysierten alternativen physikalischen Effekte verschiedener Baugruppen im Beispielprodukt der Evaluation herangezogen werden. Die Entwicklung des Grundentwurfs erfolgte ohne Berücksichtigung des späteren Skalierungswunsches, wodurch für die Skalierung teilweise ungünstige Konzepte gewählt und ausgearbeitet wurden, vgl. Abschnitt 8.1.

Einen Beitrag, der jedoch nicht auf die unmittelbare Entwicklung von Baureihen abzielt, und keine aleatorische Unsicherheit berücksichtigt, liefert DEIMEL mit Modellen und Methoden zur Analyse der Kompatibilität von Teillösungen auf Basis von Ähnlichkeitskennzahlen, die er zudem zur Identifikation von Stellschrauben zur Optimierung einer Konstruktion im Ausarbeitungsprozess nutzt.<sup>240</sup> Diese Methoden sind daher auch bei der Synthese von Lösungen nutzbar und können für die Abschätzung maßstabsabhängigen Verhaltens in der Baureihenentwicklung dienen. Im klassischen Baureihenentwicklungsprozess werden sie jedoch zu spät eingesetzt um mit geringem konstruktivem Aufwand auf Unsicherheit zu reagieren.

Ebenfalls etwas stärker syntheseorientiert als die klassische Baureihenentwicklung ist das von ROTH beschriebene Vorgehen, wobei hier vor allem konkrete konstruktive Lösungen für spezifische

und Toleranzfeldbreiten. Da die Funktion des QPV vom Höchst- und vom Mindestübermaß abhängt, der konstant bleibende Einfluss durch Oberflächenglättung aber in einem auf HOOKE'scher Ähnlichkeit basierenden konventionellen Skalierungsmodell nicht abgebildet wird, versagt ab einem kritischen Skalierungsfaktor ( $\varphi_L < 1$ ) der QPV, die Nabe rutscht auf der Welle. Diese Effekte werden in der klassischen Baureihenentwicklung nur teilweise und nicht systematisch beachtet. Die Toleranzfeldbreite, welche die aleatorische Unsicherheit durch zufällige Schwankung einer Eigenschaft beschreibt, wirkt sich ebenfalls auf die Funktionsfähigkeit des QPV aus; entsprechend (3.10) sind hier auch die Entwürfe mit  $\varphi_L < 1$  potenziell kritisch. Mit Ausnahme von Passungen und Toleranzen wird in der kBRE keine weitere aleatorische Unsicherheit in der Baureihenentwicklung berücksichtigt, relevant können aber insbesondere auch Schwankungen der Umgebungsbedingungen sein.

<sup>240</sup> Vgl. DEIMEL 2007, DEIMEL 2009a und DEIMEL 2009b.

Probleme wie z.B. dem mit der Baugröße steigenden Eigengewichtseinfluss im Mittelpunkt stehen.<sup>241</sup> Die dort gegebenen Hinweise sind eher im Bereich der Konstruktionsrichtlinien anzusiedeln und bilden für einige Probleme einen konkreten Anhaltspunkt, wie halbähnliche Anpassungen umgesetzt werden können. Ansonsten basiert auch das Vorgehen von ROTH auf den Strukturen, der klassischen Baureihenentwicklung.

---

## 4.2 Herausforderungen bei der Entwicklung komplexer Baureihen

---

Wenn Produkte, die eine gewisse Komplexität aufweisen, als Baureihe ausgeführt werden, hat der Entwickler eine Vielzahl von Problemen zu lösen. Produkte mit hohem Funktionsumfang oder einer großen Anzahl an Baugruppen oder Bauteilen weisen eine Vielzahl an Relationen zwischen diesen Systemelementen auf. Diese Vielzahl von Relationen ist zu überblicken und zu beherrschen.

*Hinsichtlich der Baureihenentwicklung ist es also wichtig, aus der Gesamtzahl der Relationen diese heraus zu filtern, die für die Skalierung des Produkts kritisch sind.*

Weiterhin steigt die Wahrscheinlichkeit, dass mehrere nicht ähnlich skalierende physikalische Effekte in einem Produkt auftreten, mit seiner Komplexität. Eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen eines Produkts kann oft nur durch unterschiedliche physikalische Effekte realisiert werden. Teilweise kommen bei gleichen physikalischen Effekten unterschiedliche Wirkprinzipien zum Einsatz, welche auf Stör- und Nebengrößen sowie Varianz unterschiedlich robust reagieren, vgl. Abschnitt 2.4. Durch die Effekt- und Wirkprinzipienvielfalt innerhalb des technischen Systems wird die Anzahl der relevanten Stör- und Nebengrößen potenziell erhöht. Der Umgang mit Stör- und Nebengrößen, die auf ein *skaliertes* Produkt wirken, ist bisher in der einschlägigen Literatur über Baureihen und Skalierung, vgl. Abschnitt 2.2, noch nicht untersucht. Hier müssen Ansätze der Prozessmodellierung und Unsicherheitsanalyse mit den Ansätzen der Baureihenentwicklung verknüpft werden.

Eine weitere Herausforderung ist, dass die Baureihenentwicklung zentral auf der Analyse eines existierenden Produkts basiert. Dies kann grundsätzlich auch ein Vorgängerprodukt sein, insbesondere wenn nur oder vorwiegend dessen Gestalt angepasst werden soll (*Gestaltvariation*) oder nur lokal begrenzt eine *Prinzipvariation*<sup>242</sup> durchgeführt werden soll.<sup>243</sup> In Zeiten kurzer Produktzyklen ist jedoch oft schon vor der Fertigstellung eines Grundentwurfs klar, dass dieser zu einer Baureihe entwickelt werden soll. Gegebenenfalls wird auch direkt eine komplette Baureihe entwickelt. Hier ist es notwendig, das Verhalten der skalierten Produktvarianten in die Syntheseschritte bei der Entwicklung des Grundentwurfs einzubinden. Es scheint daher sinnvoll, für Neuentwicklungen nicht mehr von einem Grundentwurf, sondern von einer Baureihenentwicklung zu sprechen. Den Chancen, für die Skalierung besonders günstige Lösungen zu entwickeln, steht die Herausforderung gegenüber, in jedem Entwicklungsschritt die Auswirkungen der zu treffenden Entscheidungen auf das Skalierungsverhalten zu bestimmen, zu bewerten und entsprechend zu handeln.

Hinsichtlich der Entwicklung des Vorgehensmodells ist das Vorgehen auf bereits existierende Ansätze abzustimmen, um nicht ein völlig neues Vorgehen einzuführen, wo bereits funktionierende Prozesse etabliert sind. Eine antizipativ geprägte Methodik zur Baureihenentwicklung darf daher

---

<sup>241</sup> Vgl. ROTH 2000, S. 271, außerdem ausführlich WIEDEMANN 2007, S. 639 ff. Das Eigengewicht einer geometrisch ähnlich skalierten Struktur folgt dem Wachstumsgesetz  $\varphi_{m, \text{Str}} = \varphi_{\text{mathrm}L}^3$ , die elastischen Kräfte wie in (3.2) hergeleitet mit  $\varphi_F = \varphi_{\text{mathrm}L}^2$ .

<sup>242</sup> Bspw. kann die Auswirkung des Wechsels von Verbrennungskraftmaschinen auf elektrische Maschinen im Fahrzeug auf andere Teilsysteme durch die Skalierung der Kraft- und Wärmefflüsse sowie von Massen und Bauräumen abgeschätzt und in einer Folgegeneration angepasst werden.

<sup>243</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2015, 4 f.



---

nicht losgelöst von den existierenden Ansätzen entstehen, sondern muss kompatibel zum heutigen Vorgehen von Produktentwicklern sein.

Die Vorgehensschritte müssen so aufgebaut sein, dass der Entwickler jederzeit die Sinnhaftigkeit des Vorgehens erkennen und die Ideen hinter dem Vorgehensmodell flexibel verwerten kann, um im Falle eines bereits gut skalierbaren Produktes unnötigen Aufwand „der Methode/des Modells Willens“ zu vermeiden.

---

### 4.3 Potenziale der Baureihenentwicklung, Ziel dieser Arbeit

---

Die Bewertung des Potenzials der Baureihenentwicklung und den Zielen der Arbeit kann mit einem später geringfügig zu modifizierenden Leitsatz von PAHL & BEITZ begonnen werden:

*„Die Baureihe muß zielsicher und rationell entwickelt werden, damit eine über alle Größenstufen vollkommene Funktionserfüllung gesichert ist und möglichst wenig Entwicklungskapazität gebunden wird.“<sup>244</sup>*

Zwei übergeordnete Punkte stehen hier im Fokus: Ein Vorverlagern des Skalierungsaufwandes in den eigentlichen Produktentwicklungsprozess sowie die Berücksichtigung aleatorischer und die systematische Berücksichtigung epistemischer Skalierungsunsicherheit. Die abgeleiteten Potenziale sind eine reduzierte Produkteinführungszeit durch ein Vorverlagern der Skalierungsprozesse in frühere Phasen der Produktentwicklung, was zudem die weiteren Potenziale eines durch Front-loading geprägten Entwicklungsprozesses erschließt. Änderungen können mit weniger Aufwand und Kosten umgesetzt werden, vgl. Abbildung 4.3, ein frühzeitiges Erkennen kritischer Effekte/Gestaltungszonen/Bauteile/Produkteigenschaften erlaubt die jeweils schnellste und günstigste Reaktion, der Entwicklungsaufwand sinkt insgesamt, vgl. Abbildung 4.5.

Ein stärkeres Einbinden der frühen Phasen der Produktentwicklung (insbesondere des Konzipierens) in den Baureihenentwicklungsprozess kann durch das Finden besonders gut skalierungsfähiger Gesamtlösungen unterstützt werden. Gute Skalierungsfähigkeit meint hier das Sicherstellen eines für die Kundenbedürfnisse angemessen großen tatsächlichen Skalierungsbereichs, sowie die Skalierbarkeit mit möglichst geringen halbähnlichen Anpassungen am Produkt, um die Rationalisierungsvorteile einer kostengünstigen und schnellen Entwicklung neuer Entwürfe in anderen Maßstäben sowie die einheitliche Fertigung bestmöglich auszunutzen.

Ein großes Potential zur Verbesserung des Entwicklungsprozesses ist dementsprechend insbesondere für komplexe Produkte zu erwarten. Eine anschauliche Darstellung der Möglichkeit des Entwicklers, auf die Kosten eines Produkts Einfluss zu nehmen, gibt EHRENSPIEL, vgl. Abbildung 4.6. Da die Kosten eines Produkts unmittelbar durch die Produkteigenschaften und die Lebenslaufprozesse festgelegt werden, lässt sich hier ein Analogieschluss auf die Beeinflussung anderer Eigenschaften eines Produkts ziehen; in diesem Fall auf die Skalierbarkeit, da auch sie von der günstigen Wahl der Produkteigenschaften in Hinblick auf die Lebenslaufprozesse abhängt.

Auch bei der Synthese gut skalierbarer Produkte zeigt sich Potenzial. Der Entwickler ist bei der Skalierung technischer Systeme mit den herkömmlichen Methodiken und Methoden auf Erfahrung angewiesen, um alle relevanten Effekte in die Skalierungsmodelle einzubeziehen und günstige Lösungen zu finden. Hier zeigt sich der Bedarf, den Entwickler durch strukturierte Analyse des zu skalierenden technischen Systems sowie durch geeignete Analysemethoden zu unterstützen.

Ziel ist es, eine vollständige Modellierung und Analyse der skalierungsrelevanten Einflüsse sicherzustellen. Dadurch kann die Anzahl der Fehler im Entwicklungsprozess reduziert werden, ebenso

---

<sup>244</sup> Aus PAHL und BEITZ 1974a, S. 71.



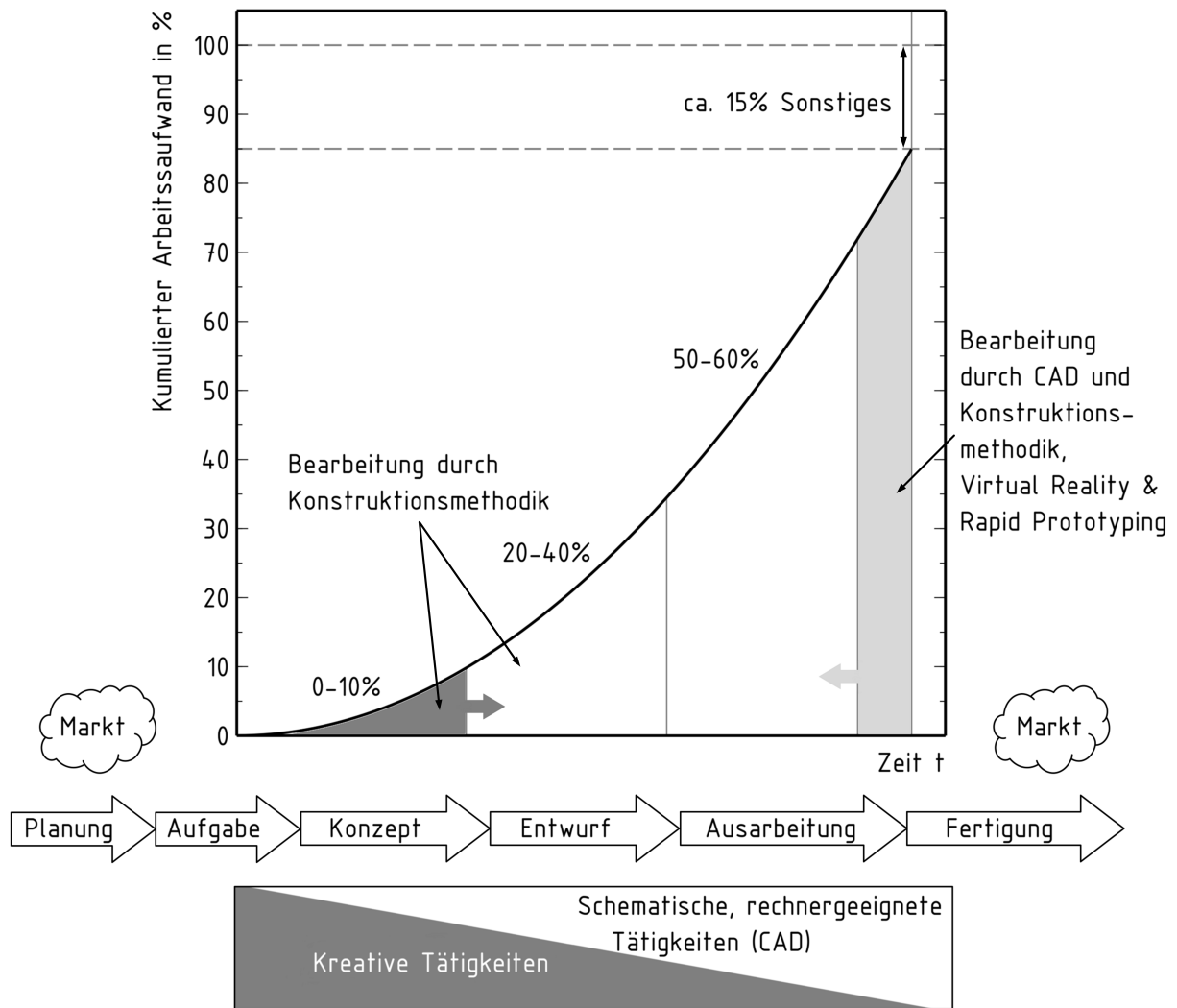


Abbildung 4.5: Der Bearbeitungsaufwand zur Entwicklung eines Produkts zugeordnet zu den Phasen der Produktentwicklung. Nach EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 1.

werden kritische Zusammenhänge früh erkannt. Unerfahrene Entwickler können mit einer die Analyse unterstützenden Methodik als Leitfaden ein Erfahrungsdefizit ausgleichen, Entwicklungsergebnisse werden weniger stark Abhängig von der Erfahrung und dem „zufälligen“ Antizipieren des Entwicklers. Durch eine umfassende Analyse der Lebenslaufprozesse wird außerdem der Grundstein für die Beherrschung von Unsicherheit gelegt. Störgrößen und Schwankungen in Flussgrößen, Eigenschaften von Operand und Operator sowie Zustandsgrößen werden sicher gefunden. Die Skalierungsmodelle können auf dieser Basis modifiziert werden, die epistemische Skalierungsunsicherheit sinkt. Varianz kann ebenfalls abgebildet und bei der Suche nach Lösungen z.B. im Rahmen des Robust Design berücksichtigt werden. Die Folge sind Lösungen höherer Qualität, da die Auswirkung von Varianz in allen Phasen des Produktlebenslaufs reduziert wird, vgl. Abbildung 2.19. Eine in allen Baureihengliedern geringe und über die Baureihe hinweg gleichmäßige Varianz führt zu geringeren Qualitätskosten und einer höheren Qualität, siehe auch Abbildung 2.15.<sup>245</sup>

<sup>245</sup> Vgl. TAGUCHI ET AL. 2005, S. 174.

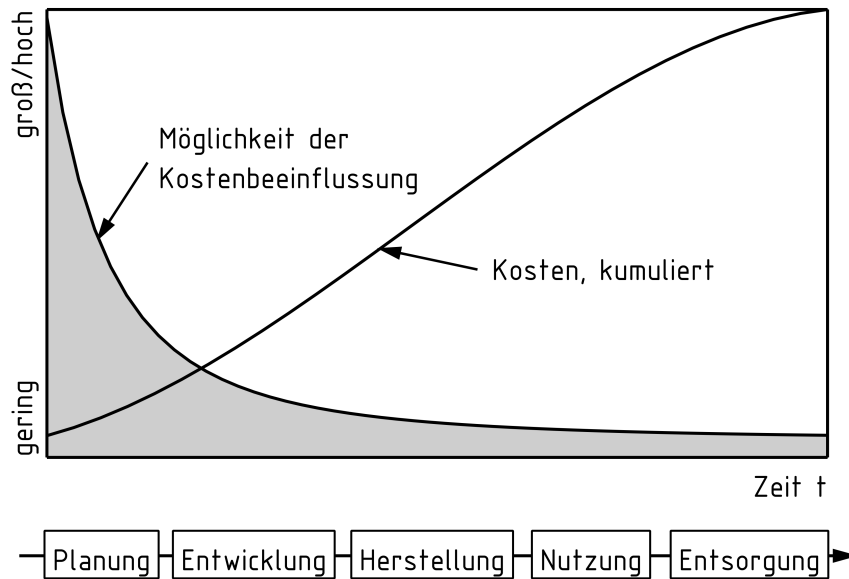


Abbildung 4.6: Möglichkeit zur Beeinflussung von Produkteigenschaften über die Phasen der Produktentwicklung hinweg. In Anlehnung an EHRENSPIEL ET AL. 2014, S. 126 und ULLMANN 2010, S. 5.

Ein wichtiges Element um über den ganzen Skalierungsbereich eine konstante Qualität sicherzustellen ist zudem ein Paradigmenwechsel in der Baureihenentwicklung. Die Voraussetzung, innerhalb einer Baureihe die Identität der Funktion zu wahren, kann erheblich erweitert werden: Es muss das Ziel des Entwicklers sein, ein gleiches relatives Verhalten, auch bei der Berücksichtigung von auf das skalierte Produkt unterschiedlich stark einwirkenden Stör- und Nebengrößen, sicherzustellen. Hierzu ist, äquivalent zur Beherrschung von Unsicherheit, eine Fokussierung auf die Ist-Eigenschaften, nicht wie bisher auf die Soll-Eigenschaften, notwendig.<sup>246</sup> Die Einbeziehung der von Maßstab zu Maßstab potenziell verschiedenen Interaktionen des Baureihenglieds mit seiner Umwelt und mit Nachbarsystemen, vgl. Abbildung 4.7, ist Grundstein der zuvor geforderten vertieften Analyse des maßstabsabhängigen Verhaltens eines technischen Systems. Ziel ist es, zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess die Auswirkung einer Festlegung von Eigenschaften auf alle Glieder der Baureihe abzuschätzen, dabei auch ungewollte Wechselwirkungen des Produkts mit seiner Umgebung zu berücksichtigen, und so gut skalierbare Lösungen zu entwickeln.

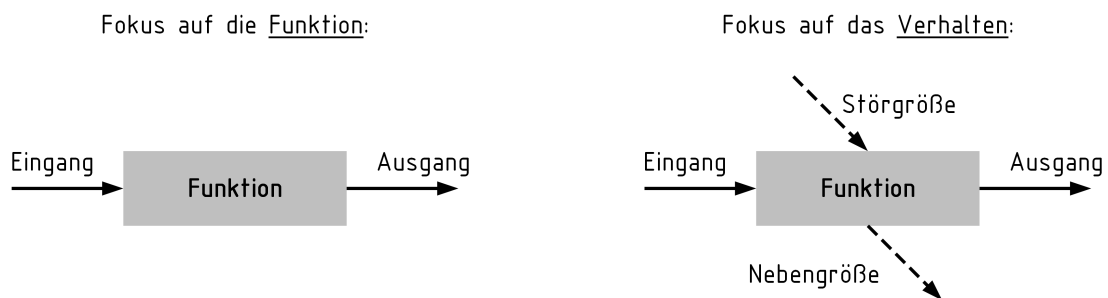


Abbildung 4.7: Ausrichtung der Baureihenentwicklung am Verhalten. Nach MATHIAS 2016, S. 45.

<sup>246</sup> Zu Soll- und Ist-Eigenschaften siehe z.B. BIRKHOFFER 2017, S. 163 und WEBER 2012, S. 43 f.

---

Eine Methodik mit einer starken Unterstützung im Bereich der Analyseprozesse wird außerdem zu einem Wissenszugewinn beim Entwickler führen, da durch die Identifikation und Bewertung einer Vielzahl von Phänomenen ein Erfahrungszuwachs hinsichtlich ähnlicher Skalierungsprobleme erfolgt. Die Lernkurve für die Skalierung einer spezifischen Produktart wird mutmaßlich steiler ausfallen als ohne methodenbasierte Anleitung.

Zusammengefasst lässt sich das Ziel der Arbeit angelehnt an das Eingangszitat, S. 60, wie folgt formulieren:

*Die Baureihenentwicklungsmethodik als Werkzeug zur Steigerung der Produktqualität und zur Rationalisierung des Entwicklungsprozesses soll in dieser Arbeit durch die Integration neuer Modelle und Methoden in den Entwicklungsprozess zu einem zielgerichteten, effizienten, Skalierungsunsicherheit beherrschenden Vorgehen verbessert werden. Ziel ist es, von der Skalierung bestehender Lösungen zur Entwicklung skalierbarer Lösungen überzugehen.*

Das Ziel lässt sich auch grafisch darstellen, vgl. Abbildung 4.8. Der Grad der Ähnlichkeit der Baureihenglieder zueinander ist maßgeblich davon abhängig, wie homogen die aus verschiedenen Anforderungen resultierenden Wachstumsexponenten für den Wert eines jeweiligen Merkmals sind. Diese Homogenität hängt maßgeblich an der Wahl der physikalischen Effekte und ihrer Interaktion mit Stör- und Nebengrößen ab. Unvereinbarkeit von Ähnlichkeit bei einigen Effektkombinationen, bspw. der mechanischen und thermischen Ähnlichkeit des in Abschnitt 3.1 als Beispiel eingeführten Stirnradgetriebes, sind unumgänglich, hier kommt es notwendigerweise zu einem Verlust an Ähnlichkeit durch halbähnliche Anpassung. Hierdurch verursachter Entwicklungsaufwand und damit verbunden -kosten sind in Kauf zu nehmen.

Der absolute Minimalaufwand ergibt sich – in Abgrenzung zum nach der Berücksichtigung notwendiger Abweichung von der Ähnlichkeit minimalen Aufwand – aus der in der Praxis zumindest für komplexere Produkte i.d.R. nicht erreichbaren vollständig ähnlichen Skalierung.

Das Potenzial generiert sich aus den vermeidbaren Abweichungen von vollständiger Ähnlichkeit, welche zu Iterationen a posteriori zum eigentlichen Skalierungsprozess führen. Diese sind vor allem auf epistemische und teilweise auf aleatorische Skalierungsunsicherheit zurückzuführen.

Eine Nutzung der Skalierungsmethoden zur Abschätzung und Beschreibung maßstabsabhängigen Verhaltens ist, genau wie der Einsatz dieser Methoden zur Skalierung der zugrundeliegenden Produkteigenschaften<sup>247</sup>, vorteilhaft gegenüber der separaten Entwicklung jeder einzelnen Ausführung der Baureihe. Gleichzeitig wird der von VIETOR und STECHERT genannte Nachteil der „nicht immer optimalen Betriebseigenschaften“ durch die Ausrichtung der Baureihenentwicklung am Verhalten, vgl. Abbildung 4.7, adressiert.

---

#### 4.4 Forschungsfragen und –ansatz

---

Aus den Zielen der Arbeit, vgl. Kapitel 1.2, und der Analyse der kBRE in diesem Kapitel ergeben sich einige Forschungsfragen. Diese lassen sich in drei Ebenen einteilen: die übergeordnete Forschungsfrage, die Forschungsfragen auf der Modellebene, sowie die Forschungsfragen, die sich auf der Methodenebene auf die Umsetzung der übergeordneten Ziele beziehen.

Die zentrale Frage, die sich aus Motivation und Ziel der Arbeit, vgl. Abschnitte 1.1 und 1.2, ableitet, ist die folgende:

*Wie kann die Entwicklung halbähnlicher Baureihen unter Berücksichtigung zeitgemäßer Methoden und Vorgehensweisen der Produktentwicklung effizient und zielgerichtet durchgeführt werden?*

---

<sup>247</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 820.

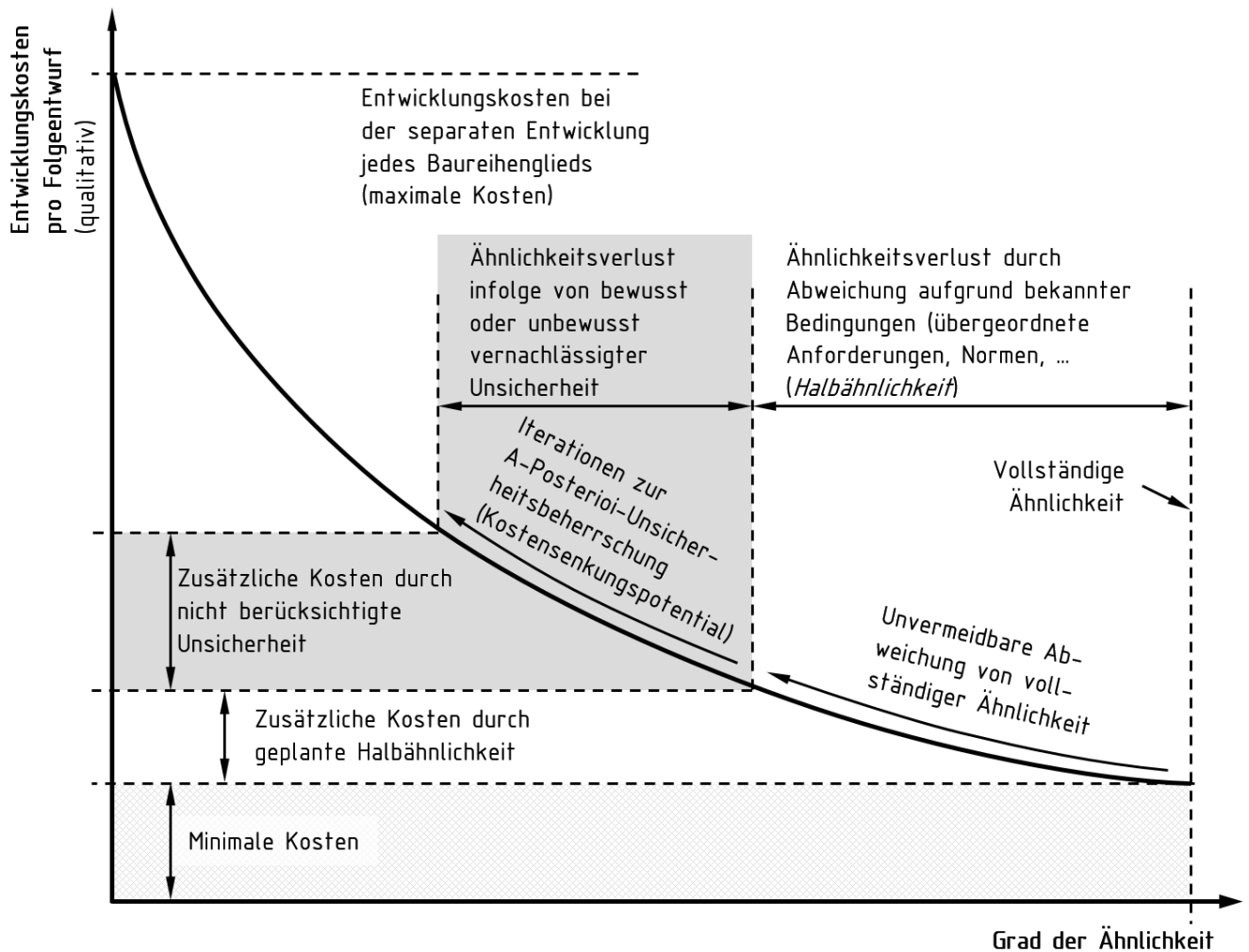


Abbildung 4.8: Kosteneinsparpotenzial eines neuen Ansatzes zur Baureihenentwicklung: Die Antizipation von Skalierungsunsicherheit (grau hinterlegt) führt zu einer Reduktion teurer Iterationsschleifen in späten Phasen der Produktentwicklung.

Hierunter gliedern sich hierarchisch die auf die Modellebene bezogenen Forschungsfragen, unterhalb derer die methodenbezogenen Forschungsfragen stehen:

- Wie kann die zusätzliche Komplexität durch größenabhängige Relationen innerhalb von Produkten bereits bei der Neuentwicklung oder bei umfassenden Anpassungskonstruktionen von Baureihen beherrscht werden?<sup>248</sup>
  - Wie gehen bestehende Methodiken mit hoher Komplexität in der Baureihenentwicklung um?
  - Welche Potenziale bietet die Nutzung der Modelltheorie zur Reduktion bzw. Handhabung der Komplexität in der Baureihenentwicklung?
- Welche Grenzen setzen die existierenden Vorgehensmodelle bei der Baureihenentwicklung, welche Potenziale können genutzt werden?<sup>249</sup>

<sup>248</sup> Diese Frage wird in den Kapiteln 5 und 6 beantwortet.

<sup>249</sup> Diese Frage wurde bereits in diesem Kapitel beantwortet; die Detailfragen werden in den Kapiteln 6 und 7 beantwortet.

- 
- Wie wird mit dem praxisrelevanten Thema der Modularisierung umgegangen?
  - Welche Methoden zur Analyse und Synthese können bei der Entwicklung von Baureihen neue Potenziale der Komplexitätsreduktion oder der Rationalisierung erschließen?
  - Wie kann die angepasste Baureihenentwicklungsmethodik hinsichtlich ihres Nutzen evaluiert werden?<sup>250</sup>

---

<sup>250</sup> Hierzu vgl. Kapitel 7.

---

## 5 Eine erweiterte Methodik zur Baureihenentwicklung

---

Dieses Kapitel beschäftigt sich auf Basis etablierter Ansätze mit der Integration antizipativer Tätigkeiten des Produktentwicklers in den Baureihenentwicklungsprozess. Die Motivation, früh in der Entwicklung durch Antizipation der Lebenslaufprozesse die Eigenschaften der Baureihe hinsichtlich der Anforderungen, Funktionsfähigkeit und Qualität positiv zu beeinflussen, wurde in Abschnitt 4.3 beschrieben.

---

### 5.1 Einführungsbeispiel zur Antizipation maßstabsabhängigen Verhaltens in der Entwicklung einer Baureihe

---

Der Herleitung eines angepassten Vorgehensmodells zur Baureihenentwicklung (BRE) ist zum besseren Verständnis des „Warum“ ein Beispiel vorangestellt. Hierzu werden die Verluste des in Abbildung 3.1 dargestellten einstufigen Stirnradgetriebes betrachtet. Das Getriebe wird gleichzeitig geometrisch ähnlich skaliert, um das übertragbare Moment anzupassen. Die Drehzahl und die übertragene Leistung folgen der CAUCHY-Ähnlichkeit, vgl. (3.5) und (3.8). Die Eigenschaften des Grundentwurfs werden in Tabelle C.1 dargestellt.

Die Verluste werden nach Reibungs- und Quetschverlusten im Zahneingriff aufgegliedert, Reibungsverlusten der Schrägkugellager, Planschverlusten beim Eintauchen der Zahnräder in den Schmierstoff und Reibungsverlusten der Radial-Wellendichtringe. Es fällt auf, dass sich in Bezug auf die geometrisch ähnliche Skalierung eine Vielfalt verschiedener Wachstumsexponenten für die Verlustleistungsanteile einstellt, vgl. (5.1).<sup>251</sup> Dabei wird davon ausgegangen, dass die Betriebstemperatur und damit auch die Stoffeigenschaften des Schmieröls konstant bleiben, eine Varianz der Temperatur infolge der Skalierung ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

$$\varphi_{PV,i} = f(\varphi_L^j) \quad (5.1)$$
$$j \in \{1, 7/4, 2, 3\}$$

Auch hinsichtlich der wegen des Einflusses auf die Stoffeigenschaften des Schmiermittels relevanten Temperaturabhängigkeit<sup>252</sup> findet sich eine große Bandbreite der Wachstumsexponenten, die sich durch die auf Konvektion, Wärmeübergang und Wärmeleitung zurückführen lassen, vgl. Anhang C.3, Gleichungen (C.15) bis (C.23):

$$\varphi_{Qab} = f(\varphi_t^j) \quad (5.2)$$
$$j \in \{-2/25, 4/15, 3/5\}$$

Der Wärmeübergang skaliert, als der thermischen Ähnlichkeit (Biot-Zahl  $Bi$ ) gehorchender Vorgang, daher nicht der aus der CAUCHY-Zahl abgeleiteten Regel für mechanische Leistungen, vgl. (3.8). Er folgt in diesem Beispiel ebenfalls einer 7/4-Potenz.<sup>253</sup>

---

<sup>251</sup> Die Zuordnung der Verlustanteile zu den Wachstumsexponenten sowie die Herleitung der Wachstumsgesetze einschließlich Quellenangaben für die zugrundeliegenden Berechnungsmodelle und die Randbedingungen finden sich in den Anhängen C.1 und C.2.

<sup>252</sup> Die kinematische Viskosität des Schmierstoffs wirkt sich auf verschiedene Verlustmechanismen im Getriebe aus, ebenso wie auf den Wärmeübergang von Öl zu Gehäusewand.

<sup>253</sup> Die Herleitung des Wärmeübergangs ist ebenfalls im Anhang in Abschnitt C.3 dokumentiert.

Grund für die jeweils unterschiedlich skalierenden Verluste ist, dass sie sich aus verschiedenen physikalischen Effekten zusammensetzen, die entsprechend nicht durch eine rein mechanische, thermische oder andere Ähnlichkeitskennzahl zu beschreiben, und damit nicht mit ihr zu skalieren sind.

Beispielsweise die Verluste in den Wälzlagern: Hier überlagern sich verlustbehaftete Verdrängungs- und Strömungsvorgänge des Schmierstoffs mit Hystereseverlusten bei der mechanischen Verformung der Wälzkörper infolge HERTZ'scher Pressung. Während letztere mit der CAUCHY-Zahl skaliert werden können, ist für die Verluste im Fluid eine Skalierung über die REYNOLDS-Zahl notwendig. Die in der Literatur zu findenden empirischen Gleichungen zur Berechnung der Lagerverluste<sup>254</sup> differenzieren die Verluste nicht nach physikalischem Effekt, sondern geben das Gesamtreibmoment für das System „Lager“ an. Eine präzise Skalierung, welche von der Selbstähnlichkeit abweicht, kann dementsprechend nicht über Ähnlichkeitskennzahlen alleine erfolgen. Hier sind Skalierungsgesetze für einzelne physikalische Effekte mit empirischen und/oder axiomatischen Modellen zusammenzufassen, um eine nach Verlustmechanismus gegliederte Skalierung durchzuführen.

Die Wachstumsgesetze für die verschiedenen Verluste einer Stirnradstufe<sup>255</sup> sind in Abbildung 5.1 a) dargestellt. Dort ist exemplarisch für die lastunabhängigen Lagerverluste der Einfluss einer Schwankung der Öltemperatur aufgetragen. Aufbauend auf diese Wachstumsgesetze zeigt Abbildung 5.1 b) anhand eines realen Getriebes ermittelte Verluste ( $\varphi_L = 1$ ) und ihr maßstabsabhängiges Verhalten. Gut zu sehen ist die Auswirkung unterschiedlicher Wachstumsexponenten für unterschiedliche Verluste verursachende physikalische Effekte. Die lastabhängigen Lagerverluste übersteigen ab etwa  $\varphi_L = 1,45$  die Verluste in der Verzahnung. Je nach Baugröße ergeben sich damit *unterschiedlich priorisierte Gestaltungszonen* z.B. für eine Anpassungskonstruktion zur Effizienzsteigerung. Die Daten, die für die Berechnung der Absolutwerte verwendet wurden, sind der Literatur entnommen.<sup>256</sup>

Vergleicht dieses nach Verlustarten differenzierende Skalierungsmodell der Getriebeverluste mit der Skalierung über die Kennzahl ( $Ca$ ), welche auf der Annahme basiert, die Verluste in einem rein mechanischen Getriebe seien überwiegend durch mechanische Effekte hervorgerufen und daher entsprechend mechanischer Ähnlichkeitsgesetze skalierbar, bietet es sich an, die bezogene Verlustleistung zu betrachten, vgl. Abbildung 5.1 c). Bezugsgröße ist hier die mit einem abstrakten, idealisierten Skalierungsmodell (CAUCHY-Ähnlichkeit), wie es in der „klassischen“ Baureihenentwicklung (kBRE) zum Einsatz kommt, bestimmte Verlustleistung. Die bezogene tatsächliche Gesamtverlustleistung zeigt, auch unter dem Einfluss veränderter Betriebstemperaturen, eine teils deutliche Abweichung vom nach  $Ca$ -Ähnlichkeit zu erwartenden Verhalten. Die Verluste werden für manche Entwürfe über-, insbesondere aber für vergrößerte Entwürfe unterschätzt, dies ist in Abbildung 5.1 b) dargestellt. Daraus resultieren eine steigende Öltemperatur und eine geringere tatsächlich am Abtrieb verfügbare Leistung gegenüber dem idealisierten Skalierungsmodell. Hier zeigt sich die Auswirkung der Zusammenfassung komplexer physikalischer Systeme zur Berechnung mit Skalierungsgesetzen, welche in ihrer groben Granularität die Komplexität der Relationen zwischen einer Vielzahl unterschiedlicher physikalischer Effekte nicht abbilden können. Die Abweichung

<sup>254</sup> Vgl. *Wälzlagerpraxis: Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen* 2015, S. 330ff., SKF 2014, S. 97 ff., LEIMANN 1982, S. 20 ff. und DAHLKE 1994, S. 280 ff.

<sup>255</sup> In Reihenfolge der Legende der real abzuführende Wärmestrom, die nach CAUCHY-Ähnlichkeit skalierte mechanische Verlustleistung, die äquivalente ideale Verlustleistung, die Zahnverlustleistung, die lastabhängigen Lagerverluste, die lastunabhängigen Lagerverluste, Planschverluste sowie die Verluste durch Reibung zwischen Radial-Wellendichtring und Welle.

<sup>256</sup> Vgl. LEIMANN 1982, S. 40 und DAHLKE 1994, S. 281.



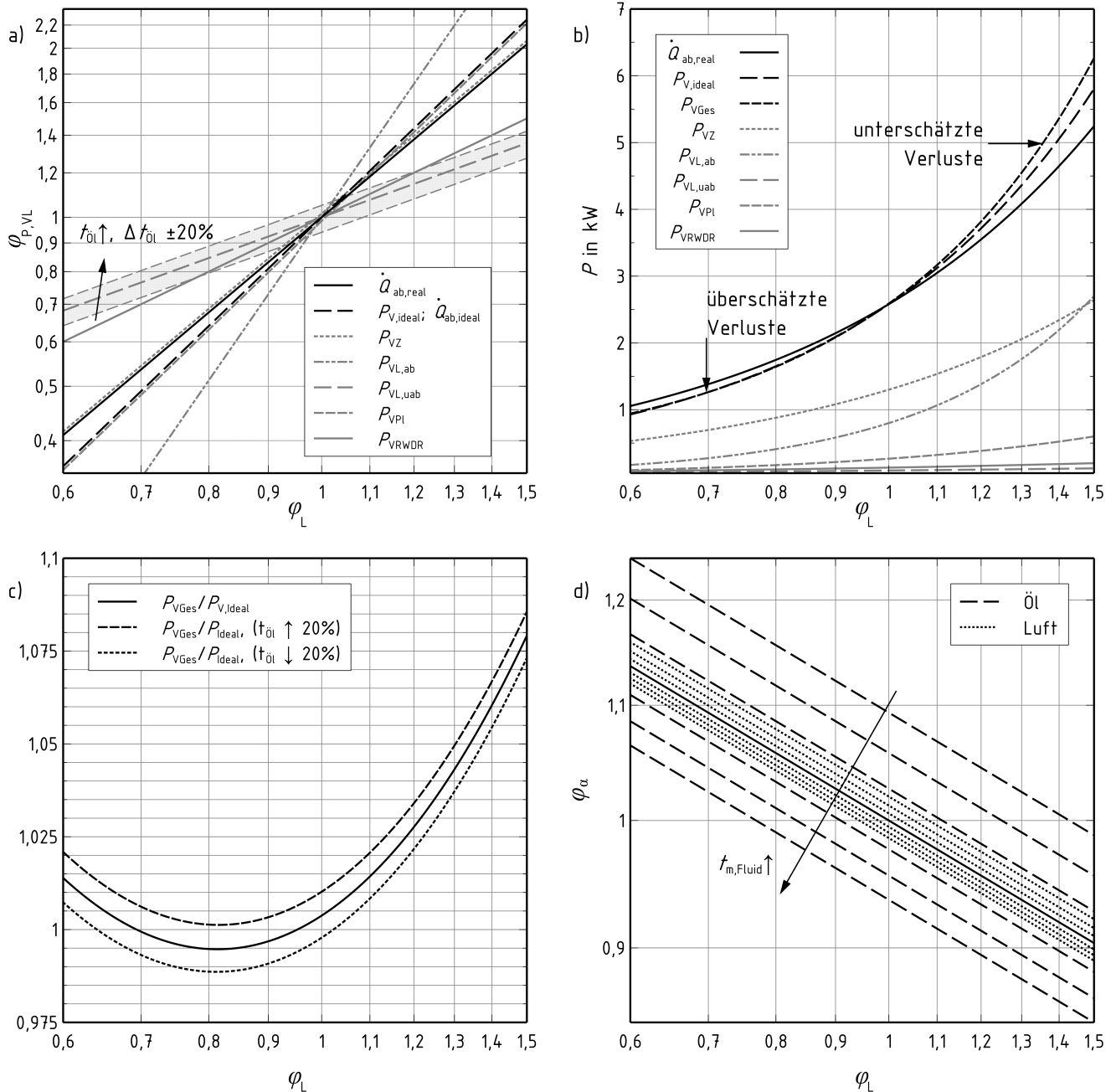


Abbildung 5.1: a) Wachstumsgesetze der einzelnen Verlustleistungen einer Stirnradstufe.  
b) Verlustleistung für ein konkretes Beispiel, Daten für den Grundentwurf nach der CAUCHY-Ähnlichkeit aus LEIMANN 1982, S. 40 und DAHLKE 1994, S. 281.  
c) Bezogene Verlustleistung, Basis ist die Skalierung nach CAUCHY-Ähnlichkeit  
d) Unterschiedliche Sensitivität der Wachstumsgesetze des Wärmeübergangskoeffizienten auf Temperaturänderungen, in Abhängigkeit der Temperatur. Alle Wachstumsgesetze und Annahmen sind in Anhang C dokumentiert.

der bezogenen Verlustleistung vom Wert 1 ist – unter der Annahme, das detailliertere Modell sei exakt<sup>257</sup> – ein Maß für den Genauigkeitsunterschied der Modelle.

<sup>257</sup> Dies ist streng genommen allein aufgrund der approximativen Herleitung der Wachstumsgesetze schon nicht der Fall. Ein exaktes Modell ist aufgrund getroffener Vereinfachungen nicht aufzustellen, vgl. Abschnitt 2.1

Für den Fall, dass zusätzliche Effekte im Skalierungsmodell abgebildet werden, gibt (5.3), mit den Werten der zu berechnenden Produkteigenschaft  $y$ , dem Index 1 für das Basismodell und dem Index 2 für das detailliertere Modell, zumindest einen Indikator für die Zunahme der Genauigkeit einer Verhaltensabschätzung infolge eines verbesserten Modells wieder, bezogen auf einen Punkt im Modellraum:

$$\Delta U_{\text{Modell}} = 1 - \left| \frac{y_{\text{Modell},2}}{y_{\text{Modell},1}} \right| \quad (5.3)$$

Diese Beziehung kann im Rahmen der Bewertung verschiedener Lösungen für ein Skalierungsproblem verwendet werden.

Eine weitere Verfeinerung des Modells ist beispielsweise durch die integrierte Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Verluste möglich. Denn die Temperaturabhängigkeit verschiedener Effekte – hier des Wärmeübergangs zur Gehäusewand, repräsentiert durch den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ , vgl. Abbildung 5.1 d) – besitzt keine gleichbleibende Sensitivität. So ändert sich der Wärmeübergang von Öl zu Gehäusewand durch die stark durch die Temperatur beeinflusste kinematische Viskosität des Öls in größerem Maße, als dies für den Wärmeübergang von Gehäusewand zu Luft gilt. Dies ist in Abbildung 5.1 d) durch die Kurvenschar sowohl für den Wärmeübergang Öl-Gehäusewand als auch für den Übergang Gehäusewand-Luft dargestellt. Ferner wird die Temperaturabhängigkeit der Viskosität für Öl und Luft von deutlich unterschiedlichen Funktionen approximiert, was bei größeren Maßstabsänderungen oder starken Temperaturänderungen zusätzlichen Einfluss ausübt.<sup>258</sup> Dies ist in Abbildung 5.1 d) dargestellt, exemplarisch für die lastunabhängigen Lagerverluste auch in Abbildung 5.1 a).

*Das Fazit hier lautet, dass das Verhalten eines Systems so früh wie möglich analysiert werden muss, um die Qualität der Aussagen durch eine Nutzung genauerer Modelle zu erhöhen. Dies beherrscht Skalierungsunsicherheit durch das Verbessern der Informationsgrundlage, auf der die Entscheidungen für oder gegen Lösungen im PEP getroffen werden. Dabei ist in Rückgriff auf (5.3) der Nutzen einer Modellerweiterung dem Aufwand gegenüberzustellen.*

---

## 5.2 Grundelemente des angepassten Vorgehensmodells zur Baureihenentwicklung

---

Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau eines neuen Vorgehens zur Entwicklung von Baureihen. Es handelt sich um die Integration größenabhängiger Analyse und Synthese in den Produktentwicklungsprozess, in dem bisher nur der Grundentwurf ohne strukturierte Berücksichtigung größenabhängiger Einflüsse erarbeitet wurde.

Die Richtlinie VDI 2221 wird als Bezugspunkt und „Dachrichtlinie“<sup>259</sup> bei vielen Autoren verwendet bzw. als Grundlage für den Entwurf erweiterter oder problemspezifischerer Methodiken genutzt<sup>260</sup> und bildet auch die Grundlage für das *Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung* nach BIRKHOFFER<sup>261</sup>, beide Vorgehensmodelle werden auf den Seiten 8 ff. besprochen. Dementsprechend ist ein auf Basis der VDI 2221 erstelltes Vorgehensmodell mit geringem Aufwand

---

<sup>258</sup> Aus Literaturwerten (vgl. *VDI-Wärmeatlas* 2013) abgeleitet kann die Änderung der kinematischen Viskosität des Öls in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich von 40 – 80 °C durch die Funktion  $\varphi_{\nu,\text{Öl}} \approx \varphi_{\text{mathrmt}}^{-1,42}$ , für trockene Luft gilt im Bereich von 40 – 80 °C das approximierte Wachstumsgesetz  $\varphi_{\nu,\text{Luft}} \approx \varphi_{\text{mathrmt}}^{0,12} + 0,88$ .

<sup>259</sup> Vgl. WEBER 2012, S. 26.

<sup>260</sup> Vgl. WEBER 2012, PAHL ET AL. 2007, EHRENSPIEL ET AL. 2014, EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, GRAMLICH 2013 u.v.m.

<sup>261</sup> Vgl. ABELE ET AL. 2005.

mit einer Vielzahl der gängigsten spezifischeren Vorgehensmodelle kompatibel bzw. kann flexibel mit ihnen verknüpft werden, ein Vergleich verschiedener VDI-2221-basierten Methodiken ist einfach möglich.

Ein auf der VDI 2221 basierendes Vorgehen bietet eine starke Systematisierung der Lösungssynthese und der Bewertung verschiedener Lösungen, was zum Problem der Baureihenentwicklung passt, sofern es sich um Neu- oder umfassende Anpassungskonstruktionen handelt. Hier spielen frühe Phasen eine große Rolle; eine systematisierte Synthese und Bewertung sorgt hier für eine Verringerung des Risikos einer Fehlentwicklung, vgl. Unterabschnitt 7.4.1.

Aufgrund seiner starken Fokussierung auf die Transformation von Eigenschaften in Lösungen steht das stark Mapping-basierte Vorgehen nach SUH im *Axiomatic Design*<sup>262</sup>, vgl. Unterabschnitt 2.1.2, in Kontrast zu den stark vorgehensorientierten Modellen (VDI 2221 und ähnliche).<sup>263</sup> Mapping-Ansätze sind jedoch mit einer Formalisierung der Produktmodelle durch die Verwendung von Eigenschaften interessant, da sie Beziehungen zwischen den unabhängigen Produkteigenschaften und Elementen anderer Domänen (Funktionen, Prozesse, Anforderungen) herstellen. Dieses Mapping ist zur Identifikation skalierungskritischer Produkteigenschaften, -funktionen und Prozesse nützlich – dadurch, dass alle Relationen expliziert werden, können sie systematisch miteinander verglichen und bewertet werden.

Auf das Mapping von Objekten verschiedener Domänen greifen verschiedene spezialisierte Ansätze, bspw. zur Ausbreitungsanalyse, zurück.<sup>264</sup> Sie können ebenfalls zur Unterstützung von Analyseprozessen verwendet werden, wenn es um Ausbreitungsprozesse von Änderungen oder das Verhalten von Produkten geht. Die Integration dieser mappingbasierten Ansätze gelingt über die Eigenschaftstheorie und das zu diesem Zweck von WEBER etablierte *Characteristics-Properties-Modelling*<sup>265</sup> (CPM). Die Prozesssicht wird konsistent hierzu durch das *Property-Driven Development* (PDD), ebenfalls von WEBER abgebildet.<sup>266</sup>

Die Verwendung eigenschaftsbasierter Ansätze zur Formalisierung von Produktmodellen eignet sich zudem für eine umfassendere Nutzung von Rechnerunterstützung<sup>267</sup>, wie sie auch in der VDI 2223 zur Verwendung vorgeschlagen werden.<sup>268</sup> Sie bildet zudem die Basis aller in Kapitel 7 zugeordneten Methoden – eine formalisierte Beschreibung des Produkts erlaubt den eindeutigen Transfer von Informationen zwischen den unterschiedlichen Modellen und Vorgehensschritten und wird in Abschnitt 6.2 in eine für die Baureihenentwicklung angepasste Modellwelt überführt.

Um die Flexibilität in der Anwendung – auch bei weniger extensiven Anpassungskonstruktionen, wie sie in der Praxis meist auftreten – zu gewährleisten, werden dem übergeordneten Vorgehensmodell in Kapitel 7 problemspezifischere Vorgehensmodelle zur Anwendung in den verschiedenen Entwicklungsphasen zur Seite gestellt. Diese Sub-Vorgehensmodelle entstammen den Bereichen des Robust Design und der Unsicherheitsbeherrschung sowie der allgemeinen Produktentwicklung.

Im Gegensatz zu CPM/PDD von WEBER ist die differenzierte Betrachtung von Funktion, Wirkprinzip und Gestalt jedoch von großer Bedeutung. Die unterschiedlichen Betrachtungsgegenstände enthalten unterschiedlich viel relevante Information für die Baureihenentwicklung. Lösungsneutral

---

<sup>262</sup> Vgl. SUH 1998.

<sup>263</sup> Vgl. WEBER 2012, S. 27.

<sup>264</sup> Vgl. u.A. HAMRAZ ET AL. 2015, S. 14 ff. AHMAD ET AL. 2012, S. 227 f. und MØRKEBERG TORRY-SMITH ET AL. 2014, S. 57 f.

<sup>265</sup> Der Ansatz wurde in der Terminologie an die Eigenschaftstheorie von WÄLDELE & BIRKHOFER angepasst, um die Integration in die ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung zu vereinfachen

<sup>266</sup> Beides vgl. WEBER 2012, S. 48.

<sup>267</sup> Vgl. WÄLDELE 2012, S. 52.

<sup>268</sup> Vgl. VDI 2223 2004, S. 68 ff.

formulierte Funktionen sind hinsichtlich der Skalierung von geringem Informationsgehalt, Gestaltungseigenschaften und ihre Relationen hingegen sind als unabhängige und daher vom Entwickler zu beeinflussende Eigenschaften auch für die Skalierung zentral, da sie in der Regel zielgerichtet angepasst werden müssen. Hierbei umfasst ein Skalierungsproblem eine Dimension mehr, als es die konventionelle Produktentwicklung und mithin der CPM/PDD-Ansatz tun, nämlich die Maßstabsabhängigkeit vieler Eigenschaften.

Entsprechend des aus ähnlichen Modellen assemblierten und für diese Arbeit des Wesens nach ebenfalls berücksichtigten CPM/PDD-Ansatzes von WEBER kann das Ziel einer Methodenunterstützung abgeleitet werden: Es ist das Ziel, möglichst viele bestehende Methoden der allgemeinen Produktentwicklung nach Bedarf in die neue Methodik zur Baureihenentwicklung integrieren zu können und ablauforientierte Vorgehensmodelle mit domänenbasierten Ansätzen zu verknüpfen.<sup>269</sup> Das Ergebnis ist eine Konsolidierung der bestehenden Ansätze unter dem Gesichtspunkt der Baureihenentwicklung, bei der zudem eine Baureihenentwicklung komplexer Produkte auch für weniger erfahrene Entwickler ermöglicht und insgesamt das Risiko einer Fehlentwicklung gesenkt werden soll. Stärker prozessorientierte Ansätze stellen den Zweck des Produktes in den Mittelpunkt, sie erlauben die Beherrschung von Unsicherheit und den Einsatz von Methoden des Robust Design, vgl. Abschnitte 2.3 und 2.4. Dadurch werden ungewollte Effekte, also das tatsächliche Verhalten des Systems, in der Entwicklung berücksichtigt.

Eine Integration dieser zweckmäßigen Werkzeuge zur Verbesserung der Baureihenentwicklung hinsichtlich ihrer in Abschnitt 4.3 erarbeiteten Potenziale in ein aktualisiertes und offenes Vorgehensmodell ist das Ziel der angepassten, neuen Baureihenentwicklungsmethodik (nBRE) und wird in Abbildung 5.2 gezeigt.

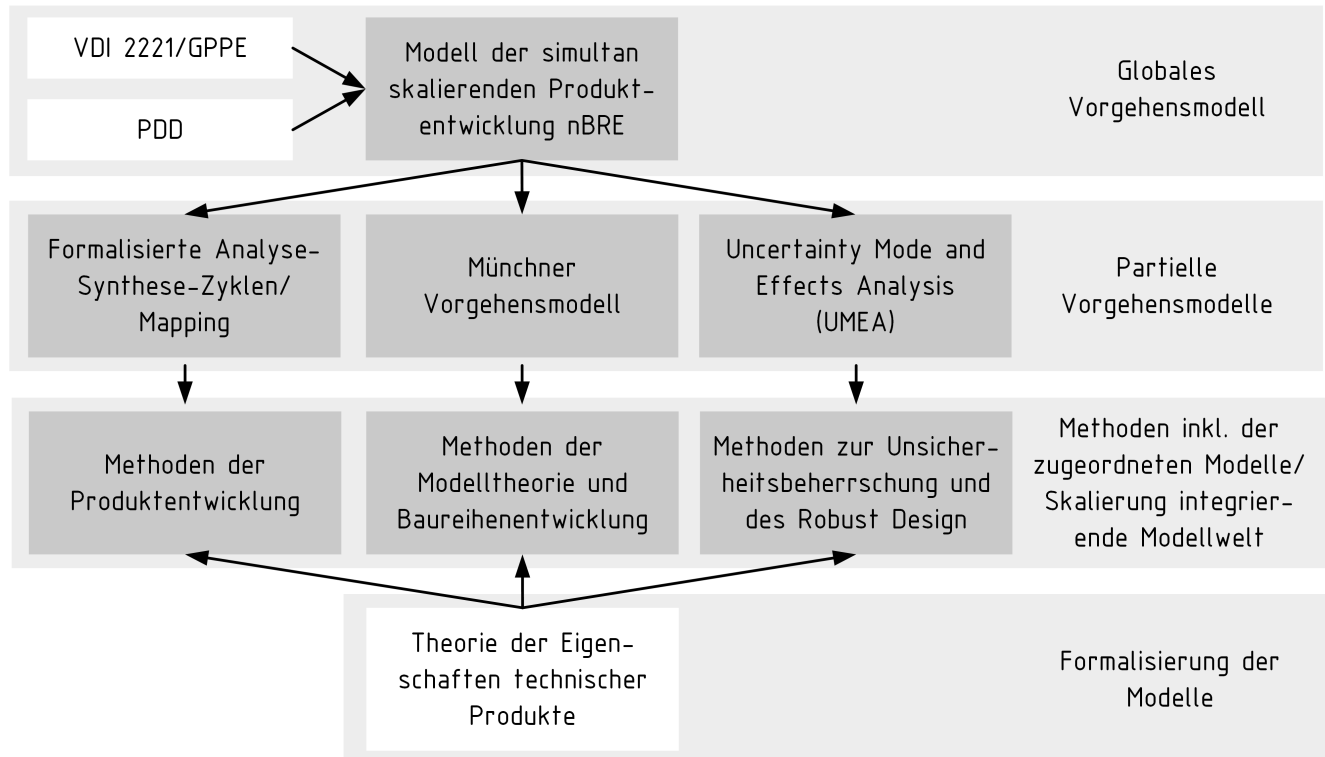


Abbildung 5.2: Elemente des angepassten Vorgehensmodells und ihre hierarchische Gliederung.

<sup>269</sup> Vgl. WEBER 2012, S. 30.

---

### 5.3 Frontloading unterstützendes Vorgehen in der Baureihenentwicklung

---

Grundidee des angepassten Vorgehens in der Baureihenentwicklung ist die Parallelisierung von Entwicklungs- und Skalierungsprozessen. Diese Prozesse laufen in den auf dem Ansatz von PAHL & BEITZ basierenden Baureihen-Entwicklungsprozessen der kBRE, vgl. Abschnitte 4.1 und 2.2, sequenziell ab. Die teilweise algorithmenbasierten Ansätze der optimierenden Baureihenentwicklung (oBRE) von SIMPSON ET AL. und MALAKOV ET AL., vgl. Abschnitt 2.2, weisen bereits eine teilweise Parallelisierung von Entwicklung und Skalierung auf, sie automatisieren die Festlegung der Gestalt und verknüpfen sie mit einer Optimierung für den jeweiligen Maßstab der Folgeentwürfe.

Durch diese Parallelisierung kann eine Funktionstüchtigkeit der Baureihe mit verringertem Umfang korrektiver Tätigkeiten erreicht werden, wodurch sich die Entwicklungszeit verkürzt. Dies beruht auf der Annahme, dass frühzeitig erkannte und behobene Fehler weniger Aufwand in der Behebung erfordern. Halbähnliche Baureihen werden durch die PPCEM rechnergestützt erzeugt.<sup>270</sup> Diese Ansätze beziehen jedoch nicht die Phasen der Aufgabenklärung und des Konzipierens mit ein, sie befassen sich nicht mit den kreativen Tätigkeiten des Entwicklers. oBRE-Ansätze stellen gewissermaßen das Bindeglied zwischen kBRE und einer zu entwickelnden, tatsächlich frontloading-betonnten Methodik dar (nBRE). Ein die Skalierung des Produkts bereits in den kreativen Phasen des Entwicklungsprozesses berücksichtigendes Vorgehen „verteilt“ den Skalierungsprozess auf alle Phasen der Produktentwicklung. Hiermit wird die angepeilte, weiter gesteigerte Parallelisierung erreicht, mit ihr geht ein höherer Arbeitsaufwand in frühen Phasen der Entwicklung einher. In Hinsicht auf die Fehlerkosten (Stichworte Gesamtentwicklungsaufwand und Markteinführungszeit) ist dies jedoch wünschenswert, wenn durch den in frühen Phasen allokierten Aufwand Fehler in späteren Phasen vermieden werden, vgl. Abbildungen 4.3, 4.5 und 4.6.

Der Fokus der nBRE hinsichtlich der frühen Phasen muss auf dem Konzipieren liegen, da mit der Auswahl physikalischer Effekte zur Realisierung von Funktionen und insbesondere mit der Auswahl von Wirkprinzipien aufgrund der in diesem Schritt auch festgelegten ungewollten Effekte die Weichen für die Skalierbarkeit eines Systems gestellt werden. Die Aufgabenklärung ist weiterhin ein hochbedeutsamer Teilprozess der Produktentwicklung, sie legt die Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines skalierbaren Produkts fest. Auf die Skalierbarkeit selbst nimmt sie jedoch nur untergeordnet Einfluss, da die Skalierbarkeit von den konkreten Teil- und prinzipiellen Gesamtlösungen abhängt, welche in der Phase des Konzipierens erarbeitet werden. Wichtig ist die Phase der Aufgabenklärung vor allem für die Festlegung des benötigten Skalierungsbereichs, welcher sich aus der Analyse der Nutzungsprozessvarianten ergibt. Sie erlaubt es außerdem, Restriktionen durch übergeordnete Anforderungen zu identifizieren und zu dokumentieren. Die Gegenüberstellung der verschiedenen Baureihenentwicklungsmethodiken und die Parallelisierung von maßstabsabhängiger Analyse und Skalierung berücksichtigender Synthese sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

In der Grundversion als „klassischer“ Entwicklungsprozess fällt der kumulierte Entwicklungsaufwand einer nBRE mutmaßlich höher aus, als in teilautomatisierten oBRE-Ansätzen – sofern bei letzteren in den frühen Phasen der Entwicklung keine Fehler gemacht werden, die zu einer unzulässigen Einschränkung des Skalierungsbereichs führen. In diesem Fall steigt der Entwicklungsaufwand der oBRE erheblich, da ein neues Konzept erarbeitet und wiederum ausgearbeitet und optimiert werden muss. Das Risiko eines ungeplant hohen korrektiven Entwicklungsaufwands wird bei einer Antizipation des maßstabsabhängigen Verhaltens des Produktes minimiert. Dies zeigt ebenfalls die Notwendigkeit eines starken Prozessbezugs der Methodik – Antizipation ungewollter

---

<sup>270</sup> Vgl. SIMPSON ET AL. 2001, S. 5 ff.





Abbildung 5.4).<sup>271</sup> In der auf die allgemeine Produktentwicklung bezogenen Form bezeichnet das bereichsorientierte Vorgehen das sequenzielle Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten einzelner Gestaltungszonen, die so gewonnenen Lösungen werden erst anschließend zu einer Gesamtlösung assembliert. Im Gegensatz hierzu steht das stufenweise-ablauforientierte Vorgehen, bei welchem der Entwickler alle Gestaltungszonen bis zu einem bestimmten Konkretisierungsgrad entwickelt, bevor er zur nächsten Konkretisierungsstufe übergeht.

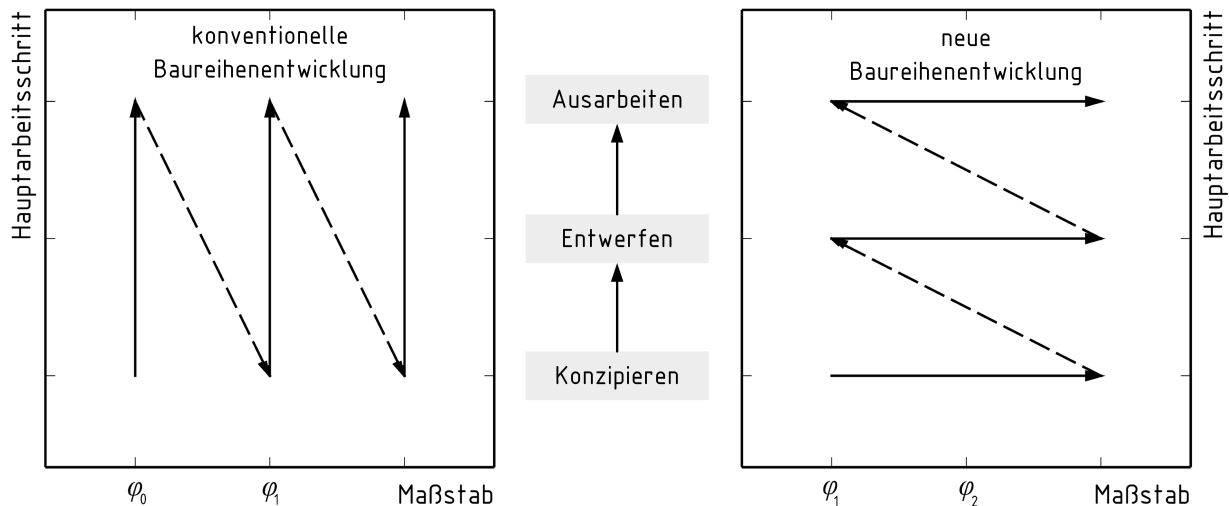


Abbildung 5.4: Vorgehen des Entwicklers in der kBRE und in der nBRE. Links ausführungswises Ableiten skalerter Entwürfe, rechts stufenweises Absichern der Skalierbarkeit im Ablauf des PEP.

Während das bereichsorientierte Vorgehen nur für erfahrene Entwickler und vorzugsweise bei der Entwicklung von Produkten mit klar abgegrenzten, sich wenig gegenseitig beeinflussenden Gestaltungszonen in Frage kommt, bietet sich das stufenweise-ablauforientierte Vorgehen insbesondere für unerfahrene Entwickler oder komplexe Entwicklungsaufgaben an. Hier können die Relationen zwischen Gestaltungszonen zum jeweils frühestmöglichen Zeitpunkt berücksichtigt werden und bei der Synthese günstige, aufeinander abgestimmte Teillösungen generiert werden.<sup>272</sup> Ferner unterstützt ein schrittweise ablauforientiertes Vorgehen das Finden innovativer Lösungen (für den Entwickler neue Lösungen, „Neuland“).<sup>273</sup> In der Praxis treten oft Mischformen auf, wobei konstruktionsmethodisch ausgebildete Entwickler hauptsächlich stufenweise-ablauforientiert arbeiten, während das rein bereichsorientierte Vorgehen nur von nicht im Methodeneinsatz geschulten Entwicklern genutzt wird.<sup>274</sup>

Aus dieser Unterscheidung lässt sich hinsichtlich der Analyse und Synthese und des Anteils korrektiver Tätigkeiten ableiten, dass ein stufenweise-ablauforientiertes Vorgehen den Anteil korrektiver Tätigkeiten reduziert, es findet keine ausgeprägte korrigierende Lösungssuche, sondern eine generative Lösungssuche statt.<sup>275</sup> Da die Reduktion korrektiver Tätigkeiten auch in der nBRE reduziert werden soll, bietet es sich an, die ablauforientierte Vorgehensweise auch zur Grundlage der Baureihenentwicklung zu machen, vgl. Abbildung 5.4. Durch die in Bezug auf ihre Skalierbarkeit

<sup>271</sup> Vgl. FRICKE 1993, S. 83 ff. PAHL ET AL. 2007, S. 70 ff. Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 122 f.

<sup>272</sup> Vgl. FRICKE 1993, S. 90 f. PAHL ET AL. 2007, S. 72 f.

<sup>273</sup> Vgl. PAHL ET AL. 2007, S. 72.

<sup>274</sup> Vgl. FRICKE 1993, S. 88.

<sup>275</sup> Vgl. PAHL ET AL. 2007, S. 73.



---

aufeinander abgestimmten Teillösungen kann als Sekundäreffekt ein größerer Grad an Ähnlichkeit bei der Skalierung der prinzipiellen Gesamtlösungen erhalten werden, mit allen folgenden Vorteilen, vgl. Abbildung 4.8. In der konventionellen Baureihenentwicklung ist der Entwickler hinsichtlich der Skalierung des Produkts nahezu ausschließlich mit schematischer Synthese und vor allem korrektiven Tätigkeiten befasst, dies resultiert aus dem sequenziellen Generieren von Grund- und Folgeentwürfen. Daraus folgt hinsichtlich der Skalierung folgender Schluss:

*Werden alle Baureihenglieder parallel entwickelt, reduziert sich der Anteil korrektiver Tätigkeiten. Komplexe Relationen zwischen Gestaltungszonen oder Produkteigenschaften, welche vom Maßstab abhängig sind, können berücksichtigt werden. Teillösungen können hinsichtlich der Skalierbarkeit aufeinander abgestimmt werden.*<sup>276</sup>

Diese Anpassung des Vorgehens erlaubt eine Einbindung der frühen, kreativen Phasen der Produktentwicklung in der Baureihenentwicklung, bzw. wird die Baureihenentwicklung umgekehrt bereits in den eigentlichen Produktentwicklungsprozess mit all seiner existierenden Methodenunterstützung integriert. Damit wird die Abschnitt 4.4 erarbeitete Forschungsfrage nach der Integration umfassender Methodenunterstützung der Baureihenentwicklung sowie das Potenzial des Frontloading (Abschnitt 4.3) durch Berücksichtigung der Skalierung in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses angesprochen.

---

#### 5.4.2 Analyse- und Synthesetätigkeiten in der Baureihenentwicklung

---

Baureihenentwicklungsprozesse gliedern sich ebenso wie gewöhnliche Entwicklungsprozesse in Phasen von Analyse und Synthese. Diese Phasen werden abwechselnd durchlaufen, wobei die Analyse auf Produktmodelle gestützt durchgeführt wird. Die anhand der Produktmodelle gewonnenen Informationen dienen als Grundlage, um während der Synthese Werte verschiedener Produktmerkmale festzulegen. Von besonderem Interesse für den Produktentwickler sind an dieser Stelle insbesondere die Relationen zwischen einzelnen Produkteigenschaften. Ab der Konkretisierungsstufe des physikalischen Effekts (vgl. die Produktmodellkonkretisierungspyramide in Abschnitt 4.1, insbesondere Abbildung 4.2) liegen in der Gesamtheit der Produktmodelle immer auch zumindest teilweise mathematische Modelle vor. Das Vorliegen algebraischer Gleichungen erlaubt es dem Entwickler, seine Einflussmöglichkeiten bei der Wahl von Werten für verschiedene unabhängige Eigenschaften (auch Konstruktionsparameter genannt) auf die abhängigen Eigenschaften gegeneinander abzuwägen. Dies geschieht üblicherweise anhand verschiedener Kriterien, die sich aus den Anforderungen ableiten.

In Bezug auf die Baureihenentwicklung findet ein zweigliedriges Vorgehen statt: Zunächst liegt eine Lösungsvorstellung des Entwicklers vor, welche sich aus der Funktionsweise des Gehirns ergibt. Der Entwickler denkt beim Konstruieren vornehmlich in Bildern.<sup>277</sup> Die Informationsverarbeitung erfolgt in Chunks (Informationseinheiten), die hinsichtlich der Anzahl beteiligter Variablen und ihrer Verknüpfung in der Handhabbarkeit begrenzt werden – so wird angenommen, dass der Entwickler 5-7 Chunks gleichzeitig berücksichtigen kann, wobei deren Verknüpfung nur bei Linearität und maximal drei Relationen noch für das Gehirn eindeutig handhabbar ist.<sup>278</sup> Das führt dazu, dass komplexere Relationen, sei es aufgrund einer höheren Anzahl an Relationen, oder aufgrund der Nichtlinearität, durch Methodeneinsatz und das Vorgehen strukturierende Modelle beherrscht werden müssen.

---

<sup>276</sup> Es verbleibt zwangsläufig ein Rest an nicht vermeidbaren Korrekturen, die aufgrund übergeordneter Anforderungen wie dem Einsatz von Normteilen erforderlich werden, vgl. Abbildung 4.8.

<sup>277</sup> Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 67.

<sup>278</sup> Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 65 f.

Ein gutes Beispiel hierfür ist das bereits behandelte einstufige Stirnradgetriebe: Eine Erwärmung des Schmierstoffs führt zu einer Verringerung seiner Viskosität, welche bis auf die Verzahnungsverluste zu geringeren Verlusten im Getriebe, also auch geringerem Wärmeeintrag führt, wodurch die Temperatur sinken kann. Ein Zirkelschluss in den Relationen, gepaart mit hochgradig nichtlinearem Verhalten (bspw. die Abhängigkeit des Temperaturübergangskoeffizienten  $\alpha$  von der Temperatur  $t$ ), verhindert eine verlässliche quantitative Aussage des Entwicklers „aus dem Kopf heraus“.

Hinsichtlich der BRE kommt weitere Komplexität hinzu; der Wärmeübergang ist nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Modellmaßstab abhängig. Es folgt eine Erhöhung der Anzahl der Relationen um mindestens eine Relation – wenn mehrere Parameter eines Modells unterschiedlich von einer Maßstabsänderung betroffen sind, steigt die Anzahl der Relationen entsprechend stärker – während die Nichtlinearität zunehmen kann, vgl. die Vielzahl gebrochener rationaler Wachstumsexponenten des Problems; vgl. (5.1) und (5.2).

Um diese Komplexität besser beherrschen zu können, ist eine Separierung der Maßstabsabhängigkeit von der allgemeinen Systemanalyse, wie sie auch von PAHL & BEITZ praktiziert wurde, zweckmäßig. Jedoch soll die Analyse der Maßstabsabhängigkeit, wie in Abbildung 5.3 gezeigt, parallel zu den Analyseschritten des allgemeinen Produktentwicklungsprozesses ablaufen, um für die folgenden Syntheseschritte eine erweiterte Informationsgrundlage bereitstellen zu können, vgl. hierzu auch die Skalierung berücksichtigende Modellwelt in Abschnitt 6.2. Aus allgemeinen Produktmodellen, mithin auch Lösungsvorstellungen des Entwicklers, werden durch Analyseprozesse Skalierungsmodelle gewonnen, die die Maßstabsabhängigkeiten des gerade betrachteten technischen Systems zweckmäßig beschreiben. Diese werden verknüpft mit den allgemeinen Produktmodellen, woraus sich eine Modellgesamtheit ergibt, welche alle für die Baureihen relevanten Eigenschaften und Relationen abbildet. Auf Basis der Analyse dieses integrierten Modells, der *Skalierung integrierenden Modellwelt* (SiM) findet dann das Generieren der nächsten Konkretisierungsstufe des technischen Systems (Produkt und Prozesse) statt, einschließlich der numerischen Festlegung von Werten für Produktmerkmale. Diesen Vorgang zeigt Abbildung 5.5.

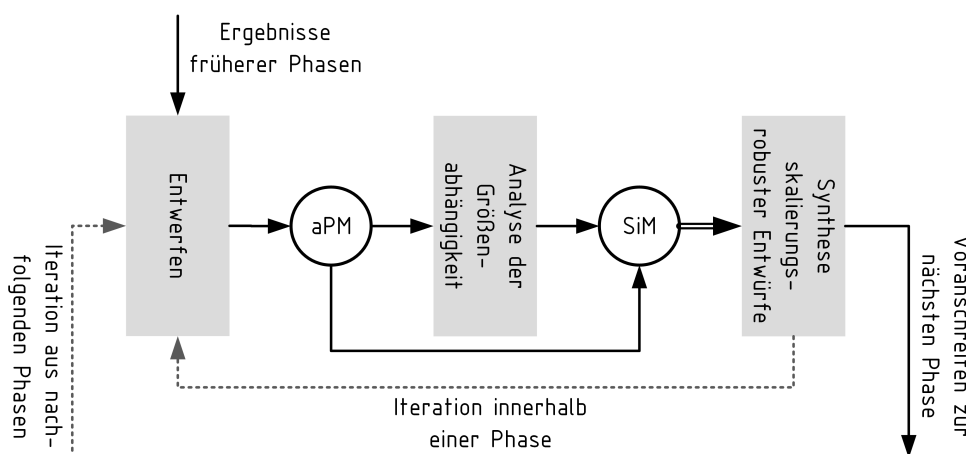


Abbildung 5.5: Analyse und Synthese innerhalb der einzelnen Entwicklungsphasen der nBRE. Schwarze Pfeile stellen notwendige Informationsflüsse dar, grau-gepunktete Pfeile optionale Iterationen. aPM steht für die allgemeinen Produktmodelle, SiM für die Skalierung integrierende Modellwelt.

## Formalisierung von Analyse und Synthese in der Baureihenentwicklung

Die Verknüpfung zwischen allgemeinen oder auch aus generischen Elementen aufgebauten Produktmodellen und der Analyse der Maßstabsabhängigkeit kann auf Basis des CPM/PDD-Ansatzes von WEBER formalisiert werden. Auf der Analyse der Maßstabsabhängigkeit basiert in der Folge die Synthese von Lösungen, die auch skaliert auf einem vergleichbaren Qualitätsniveau liegen und funktionstüchtig sind. WEBER entwickelt allgemeine Vorgehensweisen, wie sich aus unabhängigen Eigenschaften (bspw. Gestalteigenschaften) abhängige Eigenschaften (bspw. der Wirkungsgrad des Stirnradgetriebes) ableiten lassen.<sup>279</sup> Mit diesem formalisierten Vorgehen und den formalisierten zu verarbeitenden Elementen – im Rahmen dieser Arbeit als abhängige (Properties, *P*) und unabhängige (Characteristics, *C*) Eigenschaften, Relationen (*R*) und Abhängigkeiten (Dependencies, *D*) bezeichnet – ist die Nutzung von Mapping-Ansätzen wie dem Axiomatic Design und den Function-Behaviour-Structures möglich, vgl. Kapitel 6.5. Auch eine Rechnerunterstützung wird ermöglicht, bspw. über den Cambridge Advanced Modeler<sup>280</sup>, welcher die Modellierung auch verknüpfter DSM, DMM und MDM erlaubt.

Für die Nutzung in der Baureihenentwicklung sind die Modelle für Analyse- und Syntheseprozess jedoch anzupassen, vgl. Abbildung 5.6. Zum einen muss die bereits angesprochene zusätzliche Dimension von Abhängigkeiten, die Maßstabsabhängigkeit, mit berücksichtigt werden. Dies geschieht durch das Einführen von Relationsmengen, die als Vektor geschrieben werden können, und für jeweils einen Skalierungsbereich gültig sind. Weiteres zu Relationsmengen in Abschnitt 6.4.

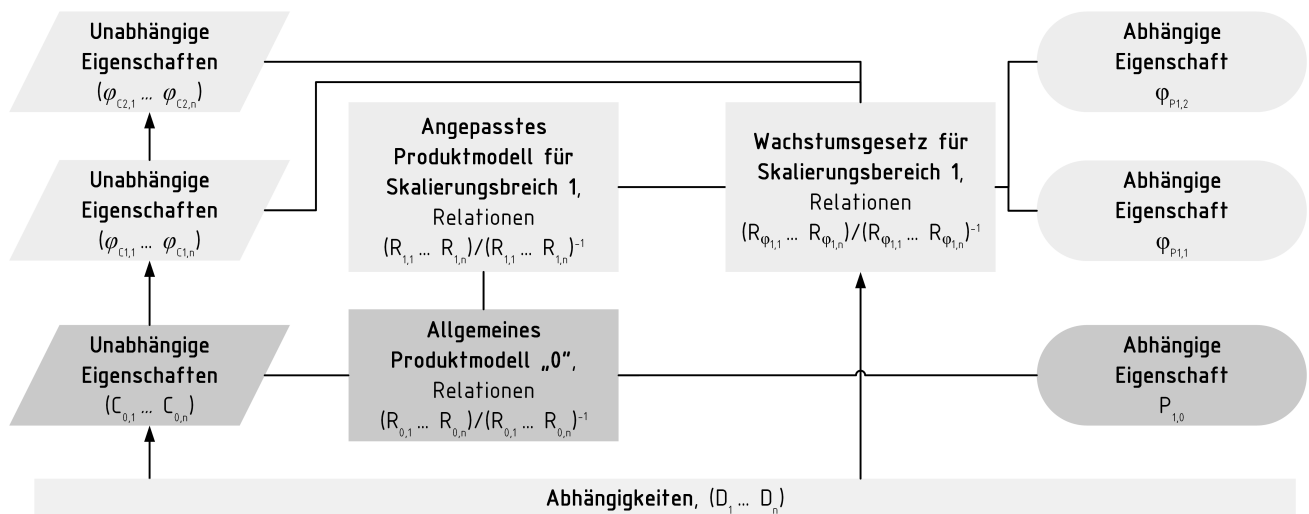


Abbildung 5.6: Analyse und Synthese nach dem CPM/PDD-Ansatz in der Baureihenentwicklung. Ungerichtete Verbindungen stellen eine wechselseitige Beeinflussung von Eigenschaften über Modelle im Zuge der analyse-Synthese-Zyklen dar; gerichtete Beeinflussung erfolgt durch Abhängigkeiten von unabhängigen Eigenschaften und Skalierungsmodellen untereinander.

Außerdem wechselwirken die für die Baureihe relevanten Abhängigkeiten ebenfalls in zwei Dimensionen. Zum einen existieren Abhängigkeiten zwischen sogenannten unabhängigen Eigenschaften, also z.B. dass die Durchgangsbohrung größer sein muss, als der Schraubennendurchmesser. Zum anderen existieren Abhängigkeiten zwischen den Wachstumsgesetzen (nicht Ähnlichkeitsbeziehungen!) verschiedener Skalierungsbereiche, bspw. um die Kompatibilität skalierten Module in einem Baukastensystem zu gewährleisten, wobei ein Bezug zwischen den abhängigen Eigenschaften

<sup>279</sup> Vgl. WEBER 2012, S. 37 & 39.

<sup>280</sup> Vgl. ENGINEERING DESIGN CENTRE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE 2009, S. .

vorliegt, beispielsweise wenn die Kühlfläche eines Kühlmoduls von der umgesetzten Leistung eines weiteren Moduls abhängt.

Wichtig ist weiterhin, dass für die Analyse und die Synthese die Bereichsweise festgelegten Skalierungsmodelle *und* die für die jeweiligen Skalierungsbereiche gültigen allgemeinen Produktmodelle verwendet werden. Der Grund für die Verwendung allgemeiner Produktmodelle und der daraus abgeleiteten Skalierungsmodelle ist, dass erst im Wechselspiel von Analyse und Synthese festgestellt werden kann, wenn der Gültigkeitsbereich der Modelle verlassen wird. Die Überprüfung der Gültigkeit erfolgt am allgemeinen Produktmodell, von dem aus wieder die Skalierungsmodelle abgeleitet werden. Dabei ist die Überprüfung beider Modelle vor allem für die Randlagen der jeweiligen Skalierungsbereiche relevant. Vergleiche hierzu Abbildung 5.7.

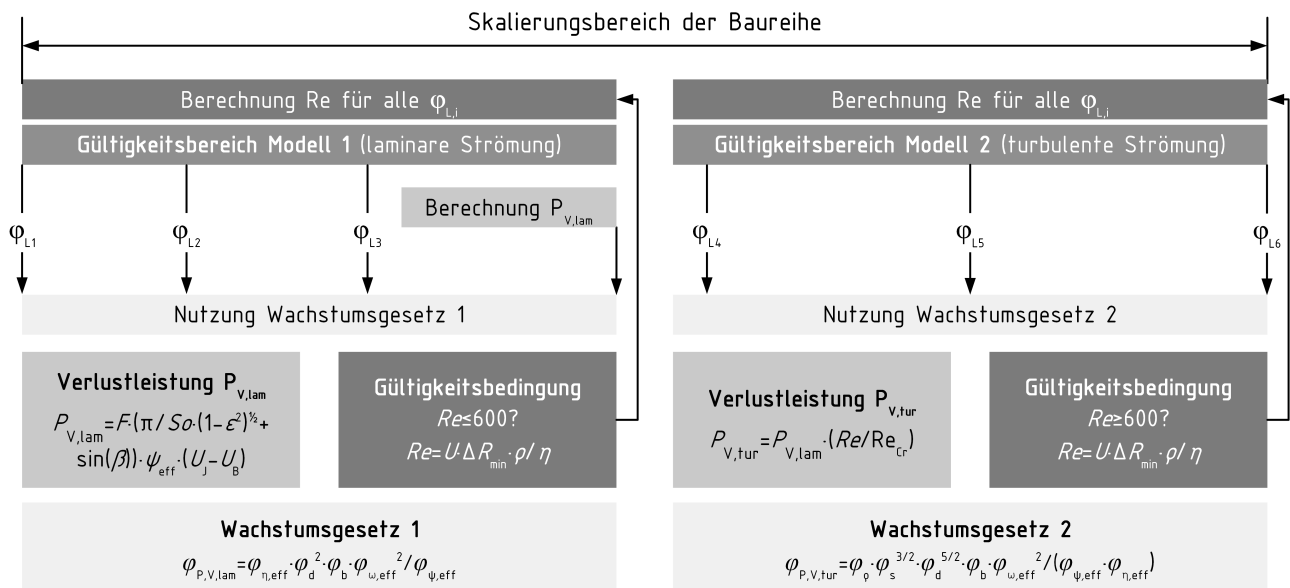


Abbildung 5.7: Gültigkeit verschiedener Modelle im Skalierungsbereich einer Baureihe: Die allgemeinen Produktmodelle werden zur Berechnung eines Ausgangswertes verwendet, während alle Entwürfe über die Wachstumsgesetze des jeweiligen Skalierungsbereichs berechnet werden. Für jeden Entwurf ist mit dem allgemeinen Produktmodell „REYNOLDS-Zahl“ die Gültigkeit des verwendeten Wachstumsgesetzes zu validieren. Die Modelle beziehen sich auf die Verlustleistung eines hydrodynamischen Radialgleitlagers, vgl. Abschnitt 8.1, LEONHARD 1984, S. 84 und WILCOCK und BOOSER 1957, S. 231.

Die Verwendung zweier Arten von Produktmodell zur Beantwortung derselben Fragestellung erhöht den Entwicklungsaufwand gegenüber der Entwicklung eines Grundentwurfs. Der Gesamtaufwand wird jedoch begrenzt durch die Nutzung der Ähnlichkeitsbeziehung und Wachstumsgesetze, die für mehrere Baureihenglieder gültig sind. Außerdem wird ein korrigierendes Eingreifen des Entwicklers auch in der kBRE nach der Fertigstellung des Grundentwurfs notwendig, wenn ein Wechsel des Produktmodells durch Überschreiten der Gültigkeitsgrenzen in der Entwicklung des Grundentwurfs nicht berücksichtigt wird.

Das Ableiten der Skalierungsmodelle selbst erfolgt durch Abstraktion aus den allgemeinen Produktmodellen. Das Vorgehen hierzu wird in Kapitel 6.4 entwickelt. Für die Synthese bedeutet dies, dass aus einer bekannten Soll-Eigenschaft (dies ist i.d.R. eine abhängige Eigenschaft) eines Systems eine (oder mehrere) mögliche Kombinationen unabhängiger Eigenschaften berechnet werden, beispielsweise das Festlegen des Querschnitts eines Biegeträgers bei gegebener Belastung.

---

Formalisiert bedeutet dies, äquivalent zu WEBER, dass die unabhängige Eigenschaft über die in Abbildung 5.6 dargestellten Relationen  $R_i^{-1}$  zwischen abhängigen und unabhängigen Eigenschaften festzulegen sind. Strategien zur Synthese werden in Abschnitt 7.4 auf Anwendungsebene entwickelt.

Selbstverständlich erhalten auch die Eigenschaften eine weitere Dimension, sie werden für skalierte Entwürfe durch Stufensprünge ausgedrückt, für  $i$  Folgeentwürfe der Baureihe und  $n$  Eigenschaften (jeweils gültig für unabhängige Eigenschaften  $C$  oder abhängige Eigenschaften  $P$ , beide werden als Relativgrößen ausgedrückt) folgen also  $i$  Eigenschaftsvektoren der Länge  $n$ .

Mehrere Größenstufen können in einem Skalierungsbereich liegen. Dann lassen sich die Analyse- oder Syntheseoperationen mit den zu den jeweiligen Eigenschaftsvektoren gehörigen Relationsmengen durchführen, vgl. S. 105.

---

## 5.5 Ein Vorgehensmodell zur Entwicklung skalierbarer Produkte

---

Basierend auf den Analyse- und Syntheseprozessen sowie den Zusammenhängen zwischen Frontloading, Parallelisierung und Beherrschung von Skalierungsunsicherheit ergibt sich ein übergeordnetes Vorgehensmodell zur Baureihenentwicklung, vgl. Abbildung 5.8. Es basiert auf dem Modell der ganzheitlichen Prozess- und Produktentwicklung nach BIRKHOFFER<sup>281</sup>. Hier wird das grundsätzliche Vorgehen der VDI 2221 um die Antizipation und bewusste Beeinflussung der Produktlebenslaufprozesse erweitert, eine unabdingbare Voraussetzung zur Beherrschung von Unsicherheit, insbesondere Skalierungsunsicherheit, vgl. Kapitel 3. Die das GPPE-Modell erweiternden Analyse-Synthese-Iterationen innerhalb der einzelnen Phasen des Produktentwicklungsprozesses basieren auf den in Abschnitt 5.4 hergeleiteten Prinzipien und Modellen.

Im Folgenden soll erläutert werden, welche konkreten Aufgaben und Herausforderungen sich für den Produktentwickler bei der Entwicklung einer Baureihe ergeben. Der Fokus liegt auf den für die Skalierung relevanten Tätigkeiten. Das Ordnungskriterium sind die Phasen des Produktentwicklungsprozesses der *neuen Baureihenentwicklung* (nBRE).

### Aufgabe klären

Beim Klären der Aufgabe wird vom Entwickler vor allem der Skalierungsbereich festgelegt. Dies umfasst die Definition der Spanne zwischen größtem und kleinstem Entwurf ebenso wie die Wahl der Stufung innerhalb der Baureihe. Die Stufung sollte sich, mit Ausnahme von Normteilen, auf abhängige Eigenschaften oder Eigenschaften des Operanden (bei aktiven Produkten) beziehen, da der Kundennutzen an diesen gemessen wird (beispielsweise das übertragbare Drehmoment in der Getriebestufe oder die Abmessungen eines auf einer Werkzeugmaschine zu bearbeitenden Werkstücks). Aus diesen Eigenschaften lässt sich, sofern das den Prozess realisierende Verfahren<sup>282</sup> bereits festgelegt ist (durch Anforderungen oder bei einer Anpassungskonstruktion) die Stufung der Wirkgrößen zur Realisierung des vom Kunden beabsichtigten Nutzungsprozesses ableiten. Ist das Verfahren vom Entwickler frei wählbar, fällt dieser Schritt in die Phase des Konzipierens.

Weiterhin ist es zweckmäßig, anhand der abhängigen Eigenschaften die Qualitätsziele für alle Baureihenglieder zu definieren, um Entscheidungskriterien für spätere Auswahl- und Bewertungsprozesse festzuhalten.<sup>283</sup> Die Qualitätsziele dienen in der Ausarbeitung als Abbruchkriterium für den Entwicklungsprozess, sind sie für alle Baureihenglieder erreicht, ist der Produktentwicklungsprozess beendet. In den Entwicklungsprozess fällt natürlich die Absicherung des Erreichens

---

<sup>281</sup> Vgl. ABELE ET AL. 2005, S. 5.

<sup>282</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 45.

<sup>283</sup> Beispielsweise das relative Spaltmaß unterschiedlich großer Karosserieteile oder die relative Wiederholgenauigkeit einer Werkzeugmaschine, jeweils einschließlich der zulässigen Varianz.

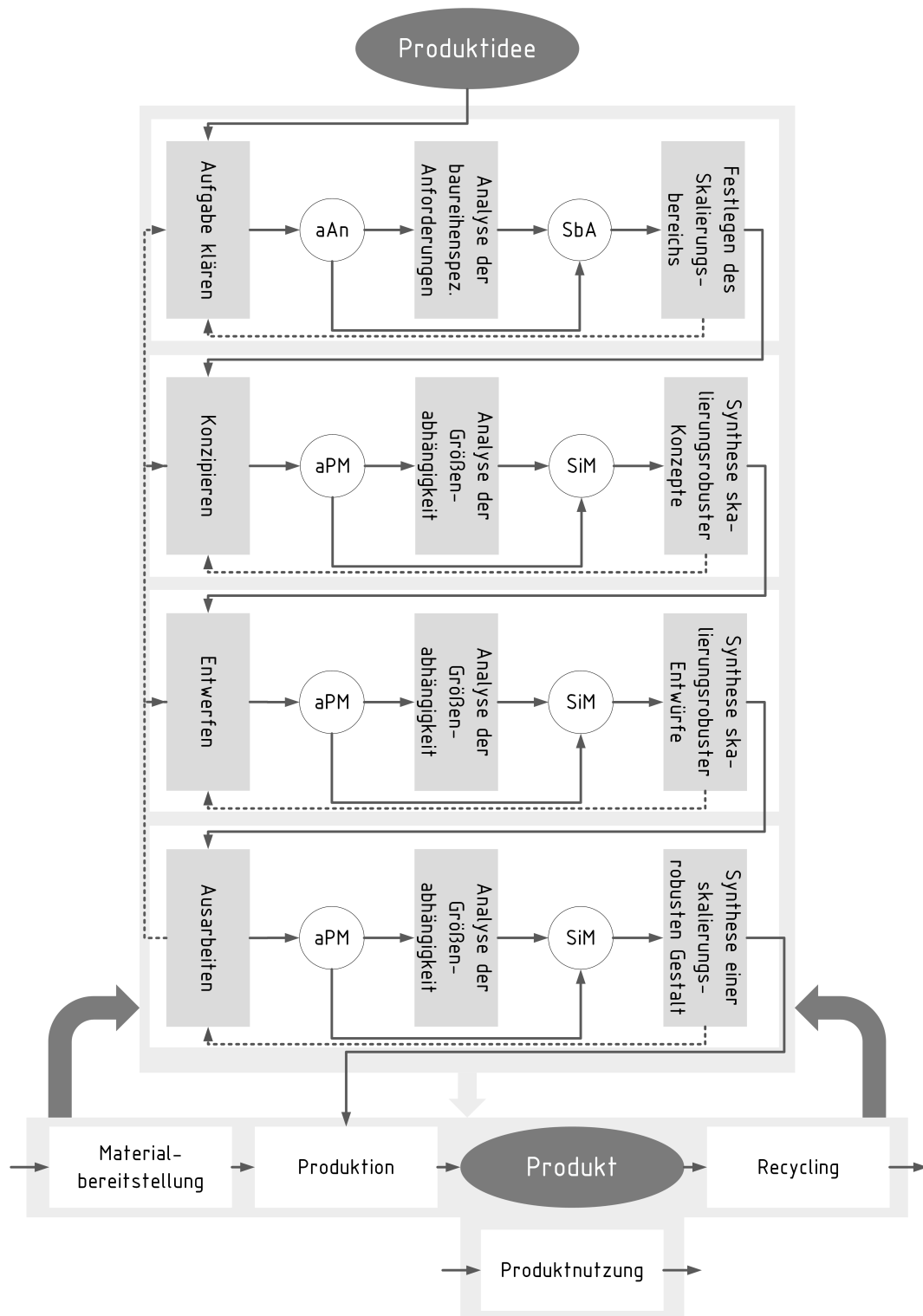


Abbildung 5.8: Vorgehensmodell zur Baureihenentwicklung mit paralleler Entwicklung aller Baureihenglieder, Berücksichtigung des Produktlebenslaufs und Nutzung einer Skalierung integrierenden Modellwelt

der Soll-Eigenschaften mit in Abhängigkeit von der gewünschten Qualität hinreichend geringer Abweichung.



Auch die Analyse der Produktumgebung zur Erfassung von Anforderungen ist für die Baureihenentwicklung zweckmäßig, weil aus nicht skalierenden Störgrößen gegebenenfalls Abhängigkeiten  $D_i$  folgen, die bei dem Ableiten von Wachstumsgesetzen oder bei der Lösungsfindung in späteren Synthesephasen zu berücksichtigen sind. Hierzu vgl. Unterabschnitt 5.4.2, zu beachten sind weiterhin die übergeordneten Aufgabenstellungen und Forderungen der Fertigung (Normen, Gleichteile etc.) oder Wachstumsgesetze (z.B. Ergonomie)<sup>284</sup>.

## Konzipieren

Das Konzipieren beinhaltet einen Großteil der kreativen Tätigkeiten in der Produktentwicklung, insbesondere die Tätigkeiten zu Beginn der Konzeptentwicklung (Abstrahieren der Aufgabe zum Erkennen der wesentlichen Probleme, Aufstellen oder Variieren von Funktionsstrukturen) sind für die Baureihenentwicklung noch nicht relevant. Eine Skalierung ist erst nach der Festlegung physikalischer Effekte sinnvoll. Ohne die Kenntnis des physikalischen Effekts können keine Ähnlichkeitsgesetze bestimmt werden, mithin auch keine bei der Skalierung ungewollt divergierenden Eigenschaften (Wärmeübergang zu übertragener Leistung im Getriebe, vgl. Abschnitt 5.1) erkannt werden. Auf dieser Konkretisierungsebene sollten jedoch Effekte mit ähnlichem Wachstumsverhalten bevorzugt werden.

Zur Ausrichtung der Baureihenentwicklung am Verhalten, vgl. Abbildung 4.7, muss, in Widerspruch zu MATHIAS<sup>285</sup> über die Funktionsstruktur hinausgegangen werden. Auf der Abstraktionsebene normierter Funktionen<sup>286</sup> kann selbst bei Kenntnis ungewollter Einflüsse keine Übertragungsfunktion hin zu einer abschätzbaren Auswirkung des Einflusses aufgestellt werden, ohne durch eine Vorfestlegung von (Teil-)Lösungen dem weiteren Produktentwicklungsprozess vorzugreifen. Geschieht dies – beispielsweise im Rahmen von Machbarkeitsstudien – wird jedoch auf weiter konkretisierte Modelle wie Wirkprinzipmodelle zurückgegriffen.

Nachdem physikalische Effekte möglicher Teillösungen gewählt sind, können jedoch erste Aussagen über die „Kompatibilität“ der Effekte hinsichtlich der Wachstumsexponenten einzelner Produkteigenschaften getroffen werden. Mit der Synthese von Wirkprinzipien eröffnet sich die Möglichkeit, auch Einflüsse von Stör- und Nebengrößen zu berücksichtigen und ihre Auswirkung auf die Skalierbarkeit des Systems zu untersuchen. An dieser Stelle wird der Grundstein zur Entwicklung gut skalierbarer Systeme gelegt. Auch hinsichtlich der Skalierungsunsicherheit bietet sich ab dieser Konkretisierungsebene die Möglichkeit, durch die Synthese robuster Lösungen mit Methoden des Robust Design die Varianz abhängiger Eigenschaften über alle Baureihenglieder hinweg positiv zu beeinflussen. Die Auswirkung von verschiedenen Teillösungen auf die Skalierungsgrenzen eines Systems wird in Abschnitt 8.1 behandelt.

Methoden zur Kombination von Teillösungen zu prinzipiellen Gesamtlösungen sowie zur Auswahl und Bewertung von Teillösungen und prinzipiellen Gesamtlösungen sind unabhängig von der Skalierung, mit dem Hinweis, Auswahl und Bewertung auf alle Entwürfe auszudehnen und eine über die ganze Baureihe günstige Lösung zu wählen. Anleitung hierzu gibt insbesondere die VDI-Richtlinie 2222.<sup>287</sup>

<sup>284</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 830 f.

<sup>285</sup> Vgl. MATHIAS 2016, S. 44 f.

<sup>286</sup> Vgl. BIRKHOFFER 1980, S. 69 ff.

<sup>287</sup> Vgl. VDI 2222 1996, S. .



## Entwerfen

Das Entwerfen beinhaltet die Wahl von Werkstoff, Fertigungsverfahren und die Festlegung der Hauptabmessungen. Bei geometrischer Ähnlichkeit ist die Skalierbarkeit hier gut gegeben, im häufigeren Fall der Halbähnlichkeit ist in Hinblick auf die Hauptabmessungen oft ein korrekatives Eingreifen notwendig. Bauraumkonflikte können, wenn eine Bauraumplanung durchgeführt wird, hier frühzeitig erkannt und korrigiert werden, ein Rückschritt in die Phase des Konzipierens kann wenn notwendig vorgenommen werden, ohne bereits die Ergebnisse der Ausarbeitung mit zu verwerfen, wie es durch die nachgelagerte Skalierung eines vollständig ausgearbeiteten Systems in der kBRE der Fall ist.

Die prinzipielle Gesamtlösung wird hinsichtlich der Nebenfunktionen vervollständigt, sofern diese nicht im Rahmen des empfohlenen schrittweise-ablauforientierten Vorgehens, vgl. Abbildung 5.4, erarbeitet wurden. Hierbei ist für die Nebenfunktionen darauf zu achten, dass eine Verträglichkeit der gewählten Effekte mit den vom Haupteffekt abgeleiteten Wachstumsgesetzen soweit möglich gegeben ist. Dies bedeutet, dass Wachstumsgesetze für unabhängige Eigenschaften, welche von mehreren zu realisierenden Effekten betroffen sind, gleiche Wachstumsexponenten dieser Eigenschaften aufweisen sollten. Alternativ sollten abweichende Wachstumsexponenten vor allem für unabhängige Eigenschaften realisiert werden, die nur einen geringen Einfluss auf den Haupteffekt aufweisen. Beispielsweise kann ein Gleitlager – im Rahmen zu beachtender Anwendungsgrenzen – durch ein Wälzlager ersetzt werden, wenn durch die verringerten Verluste der Anteil der auf das Lager zurückgehenden Beanspruchung in einem Teilsystem reduziert wird, dessen Beanspruchung mit einem anderen Wachstumsexponenten skaliert.

Anpassungen im Gesamtentwurf werden durch Analyse der Interaktionen zwischen Effekten und Gestalt vorgenommen, so z.B. die Anpassung des Grundtoleranzgrades bei einem Querpressverband (QPV). Gründe und Auswirkungen der Maßstabsabhängigkeit der Interaktion von Höchstübermaß und Festigkeit sowie Mindestübermaß und Maßnahmen hinsichtlich des QPV werden in Abschnitt 3.1, insbesondere (3.11) und Abbildung 3.3 besprochen.

Da auch Fertigungs- und Montageaspekte in der Phase des Entwurfs berücksichtigt werden, ist hier zusätzlich auf die Randlagen des Spektrums der Baureihe zu achten: Können sehr große oder sehr kleine Bauteile noch gefertigt und gehandhabt werden? Kritisch ist bei kleinen Entwürfen meist die erreichbare Präzision, während bei großen Entwürfen Masse und Abmessungen die vorhandenen Möglichkeiten von Fertigung und Montage überschreiten können. Auch Eigenschaften des Produkts werden möglicherweise tangiert, wenn die Fertigung nicht entsprechend angepasst wird – werden große und kleine Zahnräder im selben Prozess gehärtet, unterscheidet sich die relative Einhärtetiefe erheblich. Dies hat Auswirkungen auf die erreichbare Varianz von Produkteigenschaften und in der Folge auf die Varianz von Wirkgrößen und Endzuständen des Operanden. Maßstabsabhängige Varianz muss an dieser Stelle berücksichtigt werden, sollen Fehlerkosten in späteren Phasen vermieden werden.

Dies lässt sich kurz am Beispiel des Einflussfaktors der Oberflächenverfestigung zeigen, wie er bei Festigkeitsnachweisen von Wellen und Achsen zur Berücksichtigung von Oberflächenbehandlungen verwendet wird:<sup>288</sup>

Eine Varianz der Einhärtetiefe von 0,1 mm muss bei einem Wellendurchmesser von 25 mm eine größere Varianz des Oberflächeneinflussfaktors  $K_v$  nach sich ziehen, als bei einem Wellendurchmesser von 70 mm, denn  $K_{v,70\text{ mm}} \approx 1,5 \cdot K_{v,25\text{ mm}}$ , bei gleicher nomineller Einhärtetiefe und

---

<sup>288</sup> Vgl. DIN 743-2 2012, S. 31 ff.

Oberflächenhärte nimmt der Einfluss der Oberflächenbehandlung ab, bis er bei großen Durchmessern sogar völlig zu vernachlässigen ist.<sup>289</sup>

An diesem Grenzfall wird die Auswirkung offensichtlich: Schwankt die hohe Festigkeitssteigerung ( $K_v$  kann Werte bis zu 2,5 erreichen) bei kleinen Entwürfen um 10 %, wirkt sich dies proportional auf die erreichbare Festigkeit aus. Die Festigkeit weist eine hohe Sensitivität hinsichtlich Varianz der Oberflächeneigenschaften auf. Wird die Oberflächenbehandlung für große Entwürfe zunehmend irrelevant (Grenzfall  $K_v = 1$ ), verringert sich auch der Einfluss der Varianz auf die Gesamtfestigkeit bis hin zur Vernachlässigbarkeit. Wird diese Varianz nicht adäquat berücksichtigt, weisen kleine Entwürfe unter Umständen eine unzulässig hohe Streuung der tatsächlich erreichten Bauteilfestigkeit auf.

Auch abweichendes Wachstum von Maschinenelementen, bspw. hinsichtlich der Tragfähigkeit von Wälzlagern – der Wälzkörper kleiner Lager wächst schneller als der mittlere Lagerdurchmesser<sup>290</sup> – kann und sollte hier berücksichtigt werden.

Eine Möglichkeit, potenziell kritische Effekte und erst beim Entwerfen identifizierte Anforderungen gezielt mit Produkteigenschaften zu verknüpfen, um konstruktive Lösungen abzuleiten, bieten Mapping-Methoden, wie sie in Unterabschnitt 7.3.2 beschrieben werden. Das Mapping hat hier eine Überwachungsfunktion, so dokumentierte und hinsichtlich ihrer Relation quantifizierte Anforderungen können in der weiteren Produktkonkretisierung angemessen berücksichtigt werden und werden nicht vergessen bzw. erst in Iterationsschleifen berücksichtigt. Der hierzu zu betreibende Aufwand wird minimiert, wenn in der Phase des Konzipierens auf die Verträglichkeit der einzelnen Funktionsträger bei der Skalierung geachtet wird (Potenzial des Frontloadings). Beispielsweise kann in einem modularen Produkt durch eine Verwendung der gleichen Normzahlreihen für die Stufung der in Relation stehenden Eigenschaften der Schnittstellen eine direkte Verträglichkeit der Bauteile gewährleistet werden, nachträgliche Änderungen an den Schnittstellen können so reduziert werden.

## Ausarbeiten

Beim Ausarbeiten liegt der Fokus auf der Feingeometrie. Diese ist hinsichtlich der Interaktion von Skalierungsunsicherheit und Gestalt zu überprüfen. Als Beispiel kann eine Linearführung dienen, welche auf zwei Führungen läuft. Kleine Entwürfe des Schlittens sind mangels Wärmekapazität thermisch weniger träge als große Entwürfe, die maximale thermische Dehnung stellt sich schneller ein. Ein Klemmen oder Verkanten des Schlittens oder eine erhöhte Reibung aufgrund von nun zu hoher Vorspannung kann die Folge sein. Liegen periodische Temperaturschwankungen vor, reagiert der thermisch träge große Schlitten ggf. so langsam, dass diese Effekte nicht auftreten. Eine Lösung dieses Problems der Skalierungsunsicherheit durch Störgrößeneinfluss ist eine Anpassung der Gestalt. Eine Führung, die die Position des Schlittens quer zur Bewegungsrichtung nur an einer der beiden Schienen sperrt, reagiert aufgrund der statischen Bestimmtheit nicht mit Zwangskräften auf thermische Dehnungen.<sup>291</sup> Hier lassen sich, wie am Beispiel verdeutlicht, hervorragend die klassischen Prinzipien des Robust Design einsetzen, vgl. Abschnitt 2.4.

Bereits beim Entwurf identifizierte, aber noch nicht konkretisierte Bereiche antizipierter Halb-ähnlichkeit sind hier, äquivalent zur kBRE, zu gestalten. Bei einer erfolgreichen Berücksichtigung des Skalierungsprozesses und der Skalierungsunsicherheit in Konzept- und Entwurfsphase sind hier

<sup>289</sup> Vgl. DIN 743-2 2012, S. 33.

<sup>290</sup> Vgl. SKF 2014, S. 509 ff.

<sup>291</sup> Das Beispiel lehnt sich an MATTHIASSEN 1997, S. 166 an, dort werden jedoch keine Maßstabsabhängigen Effekte und keine thermische Dehnung betrachtet.

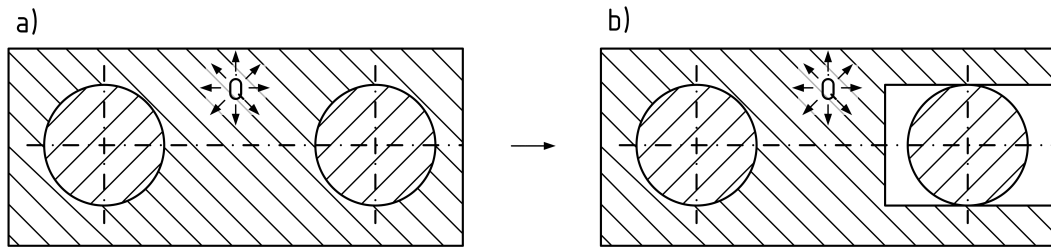


Abbildung 5.9: Gestaltvarianten einer Parallelführung unter Skalierungsunsicherheit. Variante a) neigt bei kleinen Entwürfen und periodischen Temperaturschwankungen zu erhöhter Reibung, Variante b) ist unter Wärmeeinfluss skalierungsrobust.

nur noch geringfügige korrigierende Tätigkeiten notwendig, um die Baureihen-Qualitätsziele zu erreichen.

Die Anpassung der Produktdokumentation von Baureihen erfolgt über parametrisierte CAD-Modelle<sup>292</sup>, die auf Basis der Skalierungsmodelle in der Skalierung integrierenden Modellwelt erstellt werden können.

<sup>292</sup> Vgl. KLOBERDANZ 1991, S. 92 ff.

## 6 Produktmodelle in der Baureihenentwicklung

Produktmodelle werden zu verschiedenen Zwecken in der Produktentwicklung verwendet, vgl. S. 7, dieses Kapitel beschränkt sich jedoch auf Anwendung in der nBRE, vgl. Abschnitt 5.5. Der Zweck der Modellverwendung an dieser Stelle ist also, mehrere skalierte Produktvarianten zu entwickeln. Dazu werden Modelle benötigt, die eine Abbildung maßstabsabhängiger Produkteigenschaften oder Prozesse erlauben und damit die Analyse maßstabsvarianter Systeme ermöglichen. Sie müssen außerdem eine Synthese von in verschiedenen Maßstäben funktionsfähigen Lösungen unterstützen.

Um ein in Hinblick auf die Modellierung der skalierungsrelevanten Aspekte eines technischen Systems integriertes Produktstrukturmodell zu erstellen, soll eine *Skalierung integrierende Modellwelt* (SiM) etabliert werden, die dem Entwickler alle zur Entwicklung des Produkts notwendigen Informationen bereitstellt. Dies schließt die skalierten Produktvarianten ein. Entsprechend einer auf die Produktstruktur bezogenen Kategorisierung von Produktmodellen<sup>293</sup> sollen nun kurz die Grundlagen der zugrunde liegenden Modellvorstellungen, die Beschreibungsmittel innerhalb der SiM sowie die formalen Konstrukte der SiM eingeführt werden, dies ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

<u>Modell- vorstellungen</u>	Entwicklungs- methodischer Rahmen	System- modellierung	Integriertes Produktstruktur- modell	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- VDI 2221</li> <li>- Problemlöse- prozess</li> <li>- Skalierungsmet.</li> <li>- UMEA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abbildung</li> <li>- Verkürzung</li> <li>- Pragmatismus</li> </ul>	Skalierung integrierende Modellwelt	
<u>Beschreibungs- mittel</u>	Grundelemente	Relationen	Aspektmodelle	Produktvarianten
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operatoren- und Operanden- eigenschaften</li> <li>- Zustandsgrößen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mathematische Operatoren</li> <li>- qualitative Beschreibung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dimensionsbe- haftete Produktmodelle</li> <li>- Skalierungs- modelle</li> </ul>	(Normzahl-)Reihen
<u>Formale Konstrukte</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensionslose Kennzahlen</li> <li>- Stufensprünge</li> </ul>	Theorie der Eigenschaften		

Abbildung 6.1: Grundlagen der integrierten Produktstrukturmodellierung für Baureihen. Entwickelt unter Berücksichtigung von RIEPE 2003, S. 181.

Der entwicklungsmethodische Rahmen, in welchem die SiM eingesetzt wird, basiert auf dem Vorgehensmodell der nBRE, vgl. Abschnitt 5.5, welche Elemente der VDI 2221, sowie im Vorgehen innerhalb größerer Entwicklungsabschnitte aus Problemlöseprozessen und der Uncertainty Mode and Effects Analysis (UMEA), vorgestellt in Kapitel 7, beinhaltet.

Die Modellierung skalierten Systeme orientiert sich dabei an den drei klassischen Merkmalen eines Modells nach STACHOWIAK: der Abbildung eines realen Sachverhalts, der Verkürzung um nicht

<sup>293</sup> Vgl. RIEPE 2003, S. 181.

relevante Bereiche der Realität in Abhängigkeit des Ziels der Modellierung, und dem Pragmatismus, also dem Festlegen eines Modellierungsziels<sup>294</sup>. Diese Modellmerkmale liegen der Modellierung aller technischer Systeme zugrunde und sind daher auch kennzeichnend für Skalierungsmodelle, die ebenfalls die Verknüpfung verschiedener Modellelemente beschreiben.<sup>295</sup>

Die Beschreibungsmittel, die eingesetzt werden sollen, müssen sowohl die Elemente, aus denen die Modelle der SiM bestehen, beschreiben, als auch deren Relationen. Sie müssen die Erstellung verschiedener Modelle zur Beschreibung einzelner Aspekte der Produktentwicklung und der Skalierung von Produkten ermöglichen. Ein besonderer, in der BRE zu modellierender Aspekt sind die Produktvarianten. Hierbei wird auf die in Abbildung 6.6 genauer spezifizierten Operanden- und Operatoreneigenschaften sowie die Zustandsgrößen eines technischen Systems als Grundelemente gesetzt. Dies ermöglicht die Kompatibilität mit der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung, vgl. GRAMLICH 2013 und WÄLDELE 2012, und dem sehr ähnlichen CPM/PDD-Ansatz von WEBER, beides Ansätze, welche eine Brücke zur formalisierten und damit für eine Rechnerunterstützung geeignete Produktentwicklung schlagen. Die Relationen zwischen den Grundelementen werden durch mathematische Operatoren – ab dem Konkretisierungsgrad des physikalischen Effekts – oder qualitative Beschreibungen – bei geringem verfügbarem Informationsstand oder in sehr frühen Phasen der Entwicklung – abgebildet.

Aspekte der Beschreibung des mit der nBRE unter Verwendung der SiM zu entwickelnden Systems sind die klassischen Fragen der Produktentwicklung: „Welche Lösungen gibt es? Wie gut sind sie geeignet, um das Problem zu lösen? Welche Eigenschaften weisen die Lösungen auf? Welche Ausprägung der einzelnen Merkmale führt zu einer guten Lösung?“. Darüber hinaus relevant ist insbesondere die Beleuchtung der maßstabsabhängigen Aspekte: „Funktioniert diese Lösung auch noch, wenn das Produkt verkleinert/vergrößert wird? Ändert sich die Qualität, wenn das Produkt skaliert wird? Wie kann eine äußere Produkteigenschaft (Beispiel: Geschwindigkeit) mit minimalem Änderungsaufwand skaliert werden?“.

Die formalen Konstrukte, auf die sich die Modellierung stützt, sind neben den Produkteigenschaften die Stufensprünge bzw. Relativgrößen und dimensionslose Kennzahlen als Beschreibung eines Punktes im  $\Pi$ -Raum. Durch sie soll die Kompatibilität der SiM mit der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung und den Methoden der Modelltheorie und Baureihenentwicklung auch auf feingranularer Ebene sichergestellt werden. Dabei können die dimensionslosen Größen auch als Eigenschaft aufgefasst werden: Eigenschaften sind auch für die dimensionslose Beschreibung und die Nutzung von Relativgrößen geeignet.<sup>296</sup> Die Messbarkeit, Beobachtbarkeit und/oder Berechenbarkeit ist Kennzeichen einer Eigenschaft<sup>297</sup>, womit sie sich für die quantitative Betrachtung der Skalierung eignet.

Bezüglich der formalisierten Darstellung von Produkteigenschaften von *komplexen und variantenreichen* Produkten liefert KORTLER einen Ansatz.<sup>298</sup> Es wird eine Modellierung der Elemente und Relationen eines Produkts vorgenommen, wobei drei Sichtweisen auf das Produkt unterschieden werden, die Produktsicht, die Funktionssicht und die Anwendungssicht. Während in der Produktsicht Komponenten hinsichtlich ihrer abhängigen und unabhängigen Eigenschaften modelliert werden, wird in der Funktionsdomäne der funktionale Zusammenhang zwischen den Eigenschaften abgebildet, welcher zudem durch anwendungsspezifische Einflussfaktoren beeinflusst wird. Ver-

<sup>294</sup> Vgl. STACHOWIAK 1973, S. 131 f.

<sup>295</sup> Vgl. HUBKA und EDER 1988, S. 172 f.

<sup>296</sup> Vgl. GRAMLICH 2013, S. 18.

<sup>297</sup> Vgl. WÄLDELE 2012, S. 16.

<sup>298</sup> Vgl. KORTLER 2014.

---

schiedene Phasen der Nutzung werden betrachtet, es können unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Funktion wirken. Zur Unterscheidung von Varianten werden die Phasen und Einflussfaktoren der Anwendungssicht jeweils für ein Anwendungsszenario modelliert, die Komponenten und Produktmerkmale werden entsprechend der betrachteten Produktvariante modelliert. Dadurch entsteht je Produktvarianten-Anwendungsszenario-Kombination ein Modell, welches die Relationen zwischen den Domänen und ihren Bestandteilen abbildet. KORTLER betrachtet bei der Variantenbildung den allgemeinen Fall einer Produktfamilie, der Ansatz eignet sich grundsätzlich auch für Baureihen, indem den verschiedenen Produktmerkmalen unterschiedliche Werte zugeordnet werden. Dies führt dazu, dass auch eine Baureihe mit identischem Funktionsumfang und gleichen Eigenschafts-Funktions-Interaktionen zu eine Vielzahl von Modellen führt.

---

## 6.1 Verwendung von Modellen in der Baureihenentwicklung

---

Modelle sind die Basis aller Tätigkeiten im Produktentwicklungsprozess: Um das Verhalten eines Produkts zu Analysieren, sind Modelle notwendig, die das Produkt und seine Interaktion mit anderen Elementen des zu realisierenden Prozesses sowie Nachbarsystemen beschreiben. Ebenso werden die Ergebnisse von Syntheseprozessen in einem Produktmodell, beispielsweise einem geometrischen Produktmodell in einem CAD-System hinterlegt. Damit werden sie zur Basis für weitere Analyseprozesse. Die Produktmodelle entsprechen also aus Sicht des Entwicklers einem Werkzeug und einem Wissensspeicher gleichermaßen.

Der beschriebene Wechsel zwischen Analyse und Synthese als Arbeit an Produktmodellen entspricht den Vorgehensschritten bei Analyse und Synthese in Abschnitt 5.4, kann aber noch genauer beschrieben werden. In Anlehnung an verschiedene Quellen aus dem Bereich der mathematischen Modellunsicherheit<sup>299</sup> lässt sich das in Abbildung 6.2 gezeigt Modellzyklus-Metamodell herleiten. Dies soll im Folgenden am Beispiel der Auslegung eines Last tragenden Bauteils verdeutlicht werden.

Der Entwickler hat die Zielsetzung, die Abtriebswelle des Stirnradgetriebes, vgl. Abbildung 3.1, geometrisch zu konkretisieren und zu optimieren. Er externalisiert seine Vorstellung eines technischen Zusammenhangs in einem zweckmäßigen technisch-physikalischen Modell, beispielsweise einem Freikörperbild der Welle. Dieses Freikörperbild muss zur Gewinnung von neuen Erkenntnissen, die eine Dimensionierung des Zahnrades erlauben, in ein mathematisches Modell überführt werden. Dieser Schritt kann beispielsweise das Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen für Kräfte und Momente sein. Löst der Entwickler dieses Gleichungssystem, erhält er die Lagerkräfte in Abhängigkeit der Zahnkräfte, er visualisiert sie indem er sie im Freikörperbild mit Zahlenwerten versieht.

Denselben Modellzyklus führt der Entwickler nun zur Bestimmung der Schnittkräfte durch: ortsabhängiges Kräfte- und Momentengleichgewicht aufstellen, Berechnung von die Schnittgrößen beschreibenden Funktionen, Visualisierung als Schnittkraftverlauf. Im Folgenden konkretisiert er das Modell weiter durch die Wahl eines Werkstoffs und die überschlägige Dimensionierung an kritischen Stellen, usw. usf. Je mehr Schleifen in diesem Modellzyklus durchlaufen werden, desto konkreter wird das Produkt modelliert – bis hin zur Detailoptimierung der Geometrie im Kontext einer FEM-Berechnung der Welle.

---

<sup>299</sup> Vgl. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME) - PTC 60 / V&V 10 2006, S. 5. und OBERKAMPF ET AL. 2002, S. 335.



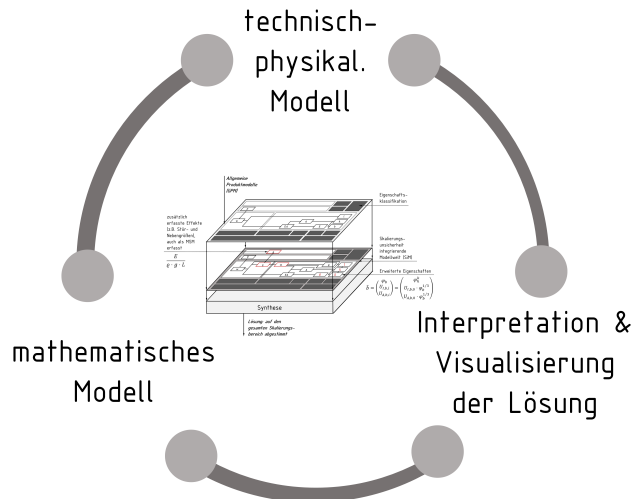


Abbildung 6.2: Modellzyklus zur Arbeit mit der Skalierung integrierenden Modellwelt.

Die Modelle umfassen also ein großes Spektrum, von Modellen des physikalischen Effekts, mit dem eine Wirkgröße, in diesem Fall eine Reaktionskraft, realisiert wird, bis hin zur Gestalteigenschaft als kleingranularstem Element eines reinen Geometriemodells.

Hinsichtlich der Baureihenentwicklung kann, bezugnehmend auf die Abschnitte 4.1 und 4.3, festgestellt werden, dass Skalierungsmodelle derzeit auf einem weniger breiten Spektrum der Konkretisierung verwendet werden, nämlich auf der Ebene physikalischer Effekte. Mit den auf der Effektebene aufgestellten Modellen werden in einem zweiten Schritt über die Wachstumsgesetze Gestalteigenschaften festgelegt.

Die nBRE zielt darauf ab, die Verwendung von Skalierungsmodellen auch auf weitere Produktmodellkonkretisierungsstufen auszudehnen. Damit soll frühestmöglich divergierendes Skalierungsverhalten verschiedener Effekte identifiziert werden. Durch eine detailliertere Modellierung dieser kritischen Effekte kann die Skalierungsmodellunsicherheit reduziert werden, vgl. Abschnitt 3.5.

Ziel der Modellverwendung in der Baureihenentwicklung muss es folglich sein, das Erstellen der physikalischen und mathematischen Skalierungsmodelle einschließlich Lösung und Visualisierung parallel zum Modellzyklus der Erstellung dimensionsbehafteter Modelle durchzuführen. Hierbei sind vier Fälle zu unterscheiden:

- Das dimensionsbehaftete Modell ist ein Monom und ist hinsichtlich der Ausprägung der Relationen und der Gültigkeit der Annahmen hinter dem Modell auf dem gesamten Skalierungsbereich gültig (Beispiel: Unwuchtkraft eines immer unterkritisch laufenden Rotors in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit): Ein Wachstumsgesetz kann direkt abgeleitet und verwendet werden, pro dimensionsbehaftetem Modell, welches diesen Bedingungen gerecht wird, wird nur ein Skalierungsmodell erstellt.
- Das dimensionsbehaftete Modell ist ein Polynom, aber hinsichtlich der Ausprägung der Relationen und der Gültigkeit der Annahmen im ganzen Skalierungsbereich gültig (Beispiel: Absenkung eines Biegebalkens bei nicht zu vernachlässigendem Eigengewicht): Aus Gründen der Vergleichbarkeit kann eine Exponentengleichung mit gebrochen-rationalem Wachstumsexponenten als Approximation des dimensionsbehafteten Modells im dimensionslosen Bereich (Verwendung von Stufensprüngen/Relativgrößen) erstellt werden – diese Approximation sorgt aber für zunehmende Skalierungsmodellunsicherheit mit stärker vom Wert 1 abweichenden



Skalierungsfaktor. Insbesondere für große Skalierungsfaktoren ist diese Abweichung vom Produktentwickler dringend zu prüfen!

Alternativ kann das dimensionsbehaftete Modell an verschiedenen Arbeitspunkten, jeweils zu den betrachteten Folgeentwürfen passend, ausgewertet werden.

- Das dimensionsbehaftete Modell ist ein Monom, die Relationen ändern sich jedoch über den Skalierungsbereich, weil Annahmen nicht mehr gültig sind (hypothetisches Beispiel: Eine noch warme 0,33 l-Bierflasche wird im Kühlschrank noch laminar umströmt, eine 0,5 l-Flasche erfährt durch die größere Lauflänge einen Umschlag in eine turbulente Strömung und damit eine Änderung des Wärmeübergangs): Hier stellt sich gemeinhin ein abweichender Wachstumsexponent ein, vgl. Abschnitt 8.1, für jeden Modellgültigkeitsbereich ist ein gesondertes Skalierungsmodell in Form eines Wachstumsgesetzes oder einer dimensionslosen Kennzahl aufzustellen.
- Das dimensionsbehaftete Modell ist ein Polynom und nicht über den gesamten Skalierungsbereich gültig (gleiches Beispiel wie zuvor, aber mit Überlagerung des Effekts der Wärmeabgabe durch Wärmestrahlung): Auch hier kann pro Skalierungsbereich eine Approximation eines Wachstumsgesetzes zur einfacheren Vergleichbarkeit erstellt werden, auch hier ist dringend auf die dann zunehmende Skalierungsmodellunsicherheit zu achten; es kann stattdessen auch ein parametrisches dimensionsbehaftetes Modell an den interessierenden Stellen rechnergestützt ausgewertet werden.

Die Fälle mit nicht über den gesamten Skalierungsbereich gültigen Modellen sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Formal betrachtet ändern sich in der Baureihe auf Produktseite – gleiche Lösungen per Definition vorausgesetzt – nur die Relationen zwischen den Grundelementen (abhängige und unabhängige Eigenschaften).

Eine Änderung der Grundelemente kann jedoch auf Seiten der Prozesse erfolgen, wenn je nach Produktvariante unterschiedliche Stör- oder Nebengrößen auftreten, beispielsweise beim Einsatz der jeweiligen Ausführungen in unterschiedlichen Umgebungen. Dann ändern sich Relationen und Grundelemente des Modells, siehe Abbildung 6.4. Dies kann sowohl die Anzahl der Elemente und Relationen betreffen, als auch die Art der Relationen und Elemente.

Tritt eine Störgröße, beispielsweise eine aufgeprägte Schwingung von außerhalb, nur für manche Baureihenglieder auf, sind die Trägheitskräfte, welche durch die Störgröße verursacht werden, auf die Gesamtbeanspruchung eines Bauteils natürlich auch nur in den mechanischen Modellen der jeweiligen Baugrößen zu Berücksichtigen. In diesen Modellen erhöht sich die Anzahl der Eigenschaften aber um die Eigenschaften der Störgröße sowie die Relationen zwischen den Eigenschaften des Bauteils und der Störgröße.

*Für die Fälle, in denen eine Überführung der Eigenschaften in Relativgrößen sinnvoll erscheint, und in denen ein Wachstumsgesetz aufgestellt werden kann, sollte dies direkt und simultan zur Erstellung der dimensionsbehafteten Modelle getan werden. In das Wachstumsgesetz können Restriktionen eingearbeitet werden, die in einzelnen Maßstäben keine Relevanz hätten, beispielsweise die Limitierung der Skalierbarkeit einzelner Geometrieeigenschaften aufgrund ergonomischer Anforderungen. Für die anderen Fälle müssen parallel zur Entwicklung immer auch mindestens die besonders großen/kleinen Entwürfe bzw. solche, die an den Grenzen eines Skalierungsbereichs bei Wechsel der Modellannahmen liegen, überprüft werden, um die Eigenschaften der Baureihe, nicht nur eines mittleren Entwurfs, abzusichern. Aus dieser Absicherung folgt nicht nur eine Beherrschung der Skalierungsunsicherheit, sondern auch ein zusätzlicher Informationsgewinn für*

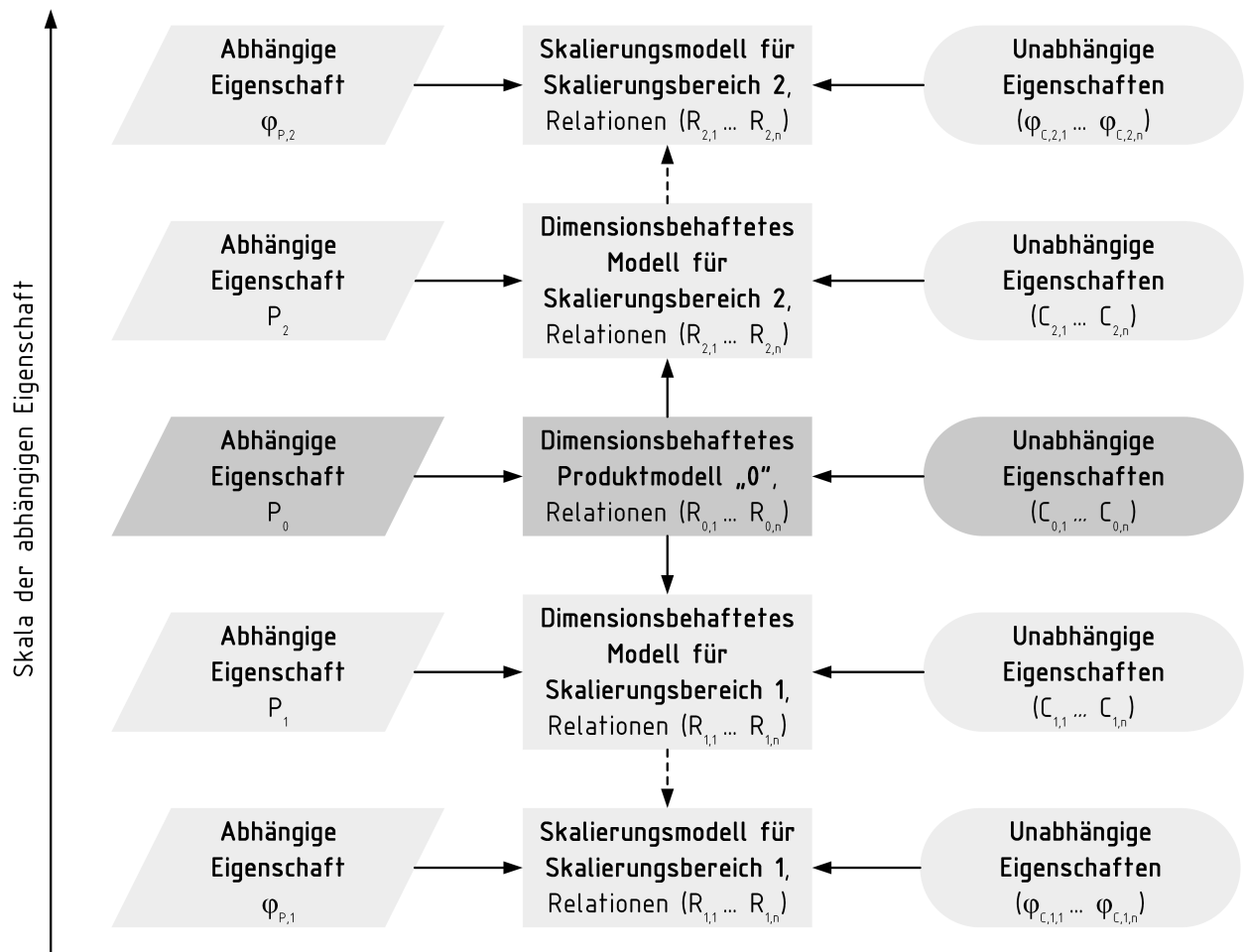


Abbildung 6.3: Ableiten maßstabs-bereichsweiser gültiger Skalierungsmodelle aus allgemeinen Produktmodellen.

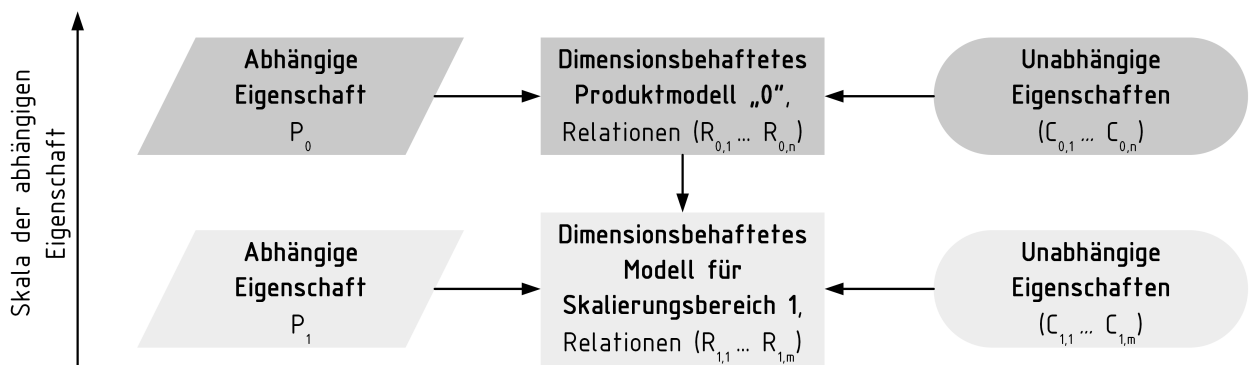


Abbildung 6.4: Wenn verschiedene Varianten der betrachteten Prozesse auftreten oder physikalische Effekte nur in bestimmten Skalierungsbereichen relevant sind, können maßstabs-bereichsweiser gültige Skalierungsmodelle auch in der Anzahl der unabhängigen Eigenschaften und Anzahl und Art der Relationen variieren.

den jeweils nächsten Syntheseprozess. Skalierungsbereiche können sich auch durch Prozessvarianten voneinander abgrenzen, wodurch je nach Fall das Abbildungs- oder das Verkürzungsmerkmal des Modells geändert werden.

## 6.2 Die Skalierung integrierende Modellwelt

Das Erarbeiten der *Skalierung integrierenden Modellwelt* (SiM) teilt sich in eine modelltheoretische Einführung und eine Beschreibung, wie die SiM im konkreten Fall aufgebaut sein kann.

### 6.2.1 Einführung

Die Schlussfolgerungen der vorigen Abschnitte werden in der SiM zusammengefasst, vgl. Abbildung 6.5. Hier werden die dimensionsbehafteten Produktmodelle um Informationen über das Wachstum einzelner Eigenschaften in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors sowie die Beschreibung ihrer maßstabsabhängige Unsicherheit erweitert. Unsicherheit kann in den mathematischen (Skalierungs-)Modellen durch eine vektor- und matrixbasierte Schreibweise der Produktmodelle abgebildet werden, sie ist in Abschnitt 6.4 beschrieben.

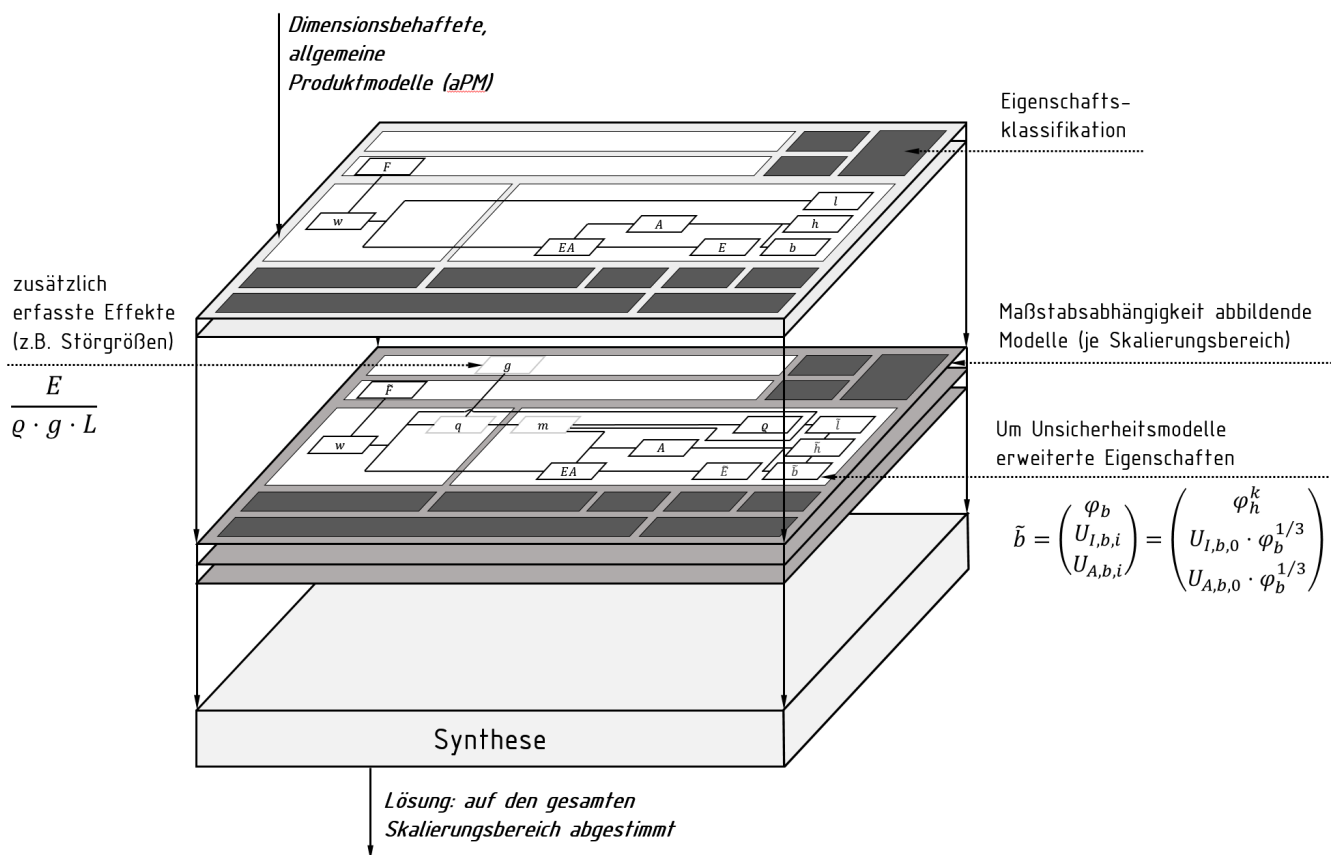


Abbildung 6.5: Darstellung der Skalierung integrierenden Modellwelt.

Auf dieser Grundlage können sowohl Aussagen über Produkte und Prozesse in einer bestimmten Größe, als auch für einen mit der jeweiligen Lösung zu erreichenden Skalierungsbereich, sofern er innerhalb des Gültigkeitsbereichs des Modells liegt, getroffen werden. Der Gültigkeitsbereich des Modells ist definiert durch die abgebildeten physikalischen Effekte und berücksichtigten Prozesseigenschaften. Die Analyse hinsichtlich der Relevanz physikalischer Effekte für ein Produktmodell kann über das Mapping der physikalischen Effekte auf die Domäne des Aspekts, welcher das Abbildungsmerkmal des Modells darstellt, ermittelt werden, vgl. Abschnitt 6.5.

Die Modellelemente der SiM sind Eigenschaften, welche ihrerseits strukturiert werden können, um dem Entwickler einen besseren Überblick über die Abhängigkeit der ihm zur Verfügung stehenden

Konstruktionsparameter von nicht zu beeinflussenden Eigenschaften, Anforderungen oder Einwirkungen des Prozesses auf die festzulegende Eigenschaft zu erlangen. Die Abhängigkeiten können ebenfalls über die baureihenfokussierte Multi-Domain-Matrix (bMDM, ausführlich in Abschnitt 6.5 dargestellt) ermittelt und dokumentiert werden. Die Modellierung einzelner Zusammenhänge außerhalb der bMDM über das Gedankenmodell der SiM ist trotzdem notwendig, da der Entwickler zwar Informationen aus einer für auch nur mäßig komplexe<sup>300</sup> Produkte(rechnergestützt) extrahieren kann, jedoch kaum mit einer eventuell Millionen Einträge umfassenden Matrix rechnen will.

Zur Kategorisierung der in der SiM abgelegten Eigenschaften ist eine von der Produktmodellkonkretisierung abhängige Analyse der Produktmodelle notwendig. Dies entspricht dem Ziel, sowohl das Produktverhalten als auch die Wechselwirkungen mit Prozessen<sup>301</sup> zu berücksichtigen. Damit soll eine höhere Überdeckung der im Modell abgebildeten Realität mit der relevanten Realität erreicht werden, vgl. Abbildung 2.13. Die methodische Erstellung eines zur Realität möglichst passenden Modells wird im Rahmen der Übertragung der UMEA-Methodik in Abschnitt 7.2 dargestellt.

Die Modellierung von Produkt und Prozess unterscheidet sich deutlich, was sich durch die Gliederung der Abbildung 6.6 in Funktions- und Prozesssicht erklärt. Beide beschreiben eine Transformation. Der Prozess<sup>302</sup> transformiert ein stoffliches Objekt (den Operanden) in einer definierten Zeit von einem bestimmten Anfangs- in einen bestimmten Endzustand, während im Produkt (als Operator) die Transformation von Stoff-, Energie oder Signalflüssen, beschrieben durch Funktionen, ohne konkreten Zeitbezug erfolgt.<sup>303</sup> Die Schnittstelle zwischen dem Produkt als Arbeitsmittel und dem Prozess ist die Wirkgröße, sie ist für den Ablauf des Prozesses verantwortlich und die Ausgabegröße der Gesamtheit der Produktfunktionen.<sup>304</sup>

Hinsichtlich der Skalierung eines Systems ist folgende Argumentationskette zum Verständnis wichtig: Ziel des Kunden ist die Skalierung einer Prozessgröße, denn der Prozess ist der eigentlich verfolgte Zweck. Das Produkt ist nur das Mittel zum Zweck (*Arbeitsmittel*).<sup>305</sup> Die zu skalierende Prozessgröße kann eine Gestalteigenschaft des Operanden sein (der Kunde will größere Bauteile auf der Werkzeugmaschine fertigen), eine Eigenschaft des Operanden am Endzustand (der Endzustand soll zu einem früheren Zeitpunkt  $t_1$  vorliegen, das Bauteil also schneller gefertigt werden) oder er erwartet eine skalierte Zustandsgröße (er möchte höhere Schnittgeschwindigkeiten). Alle diese Wünsche nach Skalierung im Prozess können zur Entwicklung einer skalierten Produktvariante, also einer Baureihe führen; und sie alle beeinflussen in irgend einer Weise die Wirkgröße. Für die folgenden Erläuterungen wird vorausgesetzt, dass der Prozess als solcher bereits festgelegt wurde, also ein Verfahren und damit auch ein physikalischer Effekt gewählt wurden; der Operand wird ebenfalls als unveränderlich vorausgesetzt (der Kunde möchte eine bestimmte Welle drehen, und nicht einen Motorblock gießen).

<sup>300</sup> Bezogen auf die Anzahl der Eigenschaften.

<sup>301</sup> Diese sind als Teil ganzheitlicher Produkt- und Prozessentwicklung sowie als Notwendigkeit zur Beherrschung von Unsicherheit zwingend zu betrachten.

<sup>302</sup> Gemeint ist hier ein Nutzungsprozess, in allen anderen Lebenslaufprozessen nimmt das Produkt die Rolle des Operanden ein.

<sup>303</sup> Vgl. GRAMLICH 2013, S. 70 f.

<sup>304</sup> An dieser Stelle sind nur die Funktionen, also gewünschte Transformationen, gemeint; das Verhalten eines Arbeitsmittels umfasst i.d.R. weit mehr Ausgabegrößen, bspw. Abwärme in Form thermischer Energie.

<sup>305</sup> Vgl. HEIDEMANN 2001, S. 110 ff.

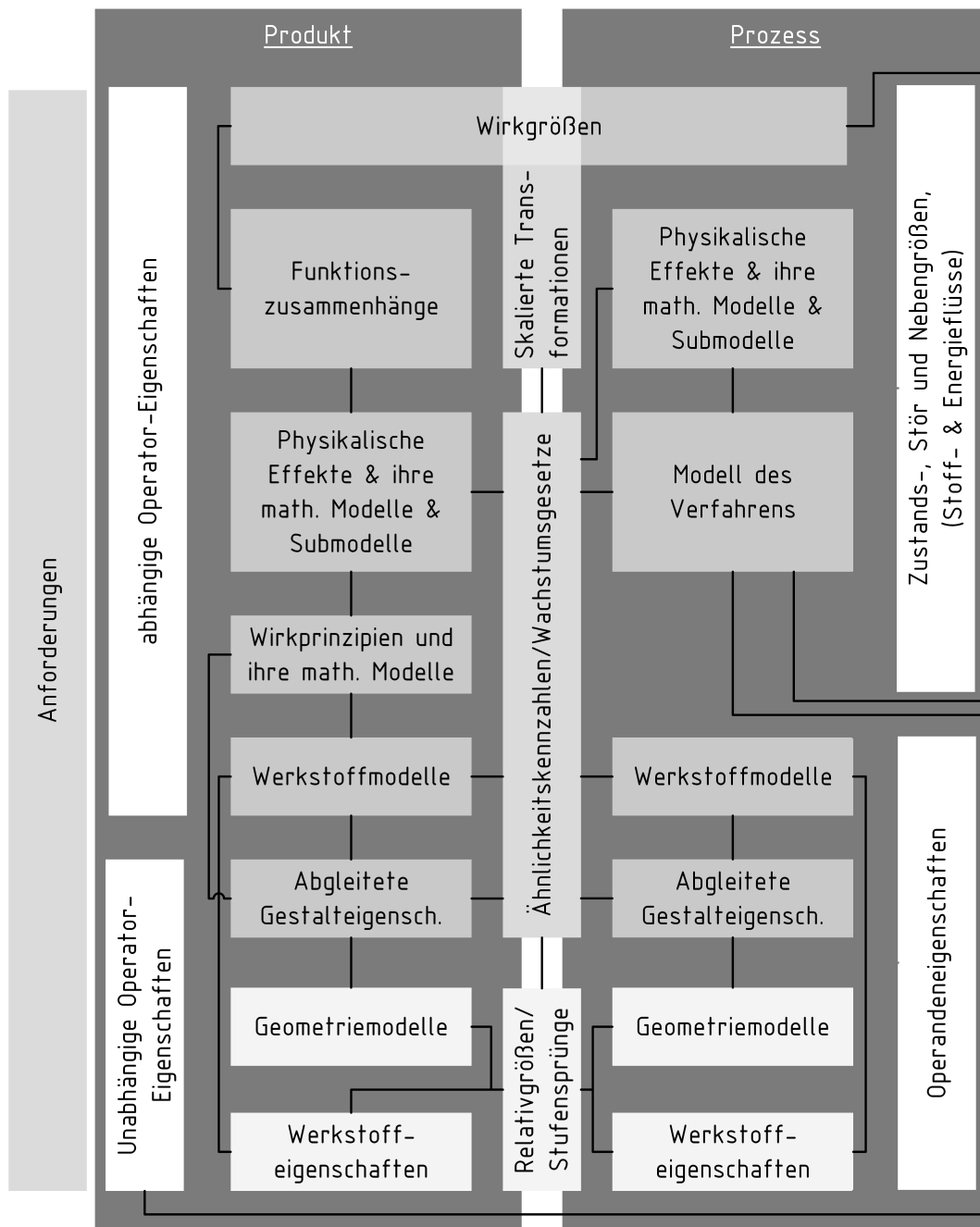


Abbildung 6.6: Abhängigkeiten der Modelle von Produkt, Prozess und Skalierung.

In Bezug auf den Aufbau der SiM ist also festzuhalten, dass ein physikalisches Modell des Prozesses vorliegt, sowie seine Konkretisierung in einem Verfahren.<sup>306</sup> Weiterhin sind die Operandeneigenschaften bekannt. Hiermit lassen sich nun ein Satz von  $\Pi$ -Kenngrößen aufstellen und die jeweiligen Exponenten ermitteln, sodass je nach Formulierung ein kennzahlenbasiertes Skalierungsmodell oder ein Wachstumsgesetz für die Wirkgröße in Abhängigkeit der Prozesseigenschaften (Operandeneigenschaften, davon abgeleitete Eigenschaften<sup>307</sup>, Stoff- und Energieflüsse) zur Verfügung steht. Mit diesem prozessbeschreibenden Skalierungsmodell, welches sich hinsichtlich der

<sup>306</sup> Vgl. GRAMLICH 2013, S. 86 f.

<sup>307</sup> Diese gehen als Submodelle physikalischer Effekte ein; beispielsweise die stellt das Flächenträgheitsmoment der zu fertigen Welle ein Submodell des Effekts „elastische Verformung“ dar.

---

enthaltenen Informationen aus einem Prozessmodell<sup>308</sup> abgeleitet, kann nun direkt eine Veränderung an irgend einer die Wirkgröße beeinflussenden Prozess- oder Operandeneigenschaft in eine skalierte Wirkgröße umgerechnet werden.

Auf Basis dieser skalierten Wirkgröße startet nun die Entwicklung der Baureihe bzw. der skalierten Produktvariante. Mit der skalierten Wirkgröße, dem skalierten Prozess und den ggf. skalierten Operandeneigenschaften liegt die skalierte Transformation auf der Prozessseite vor, noch nicht jedoch die auf der Produktseite. Da die funktionalen Zusammenhänge keinerlei quantitative Aussage über die notwendige Veränderung der Eingangsgrößen bei Veränderung der Ausgangsgröße (Wirkgröße) erlauben, kann die Quantifizierung erst nach der Analyse des Arbeitsmittels auf weniger abstrakten Ebenen – bei vollständiger Ähnlichkeit auf Ebene der physikalischen Effekte, ansonsten erst auf Wirkprinzip- oder Gestaltebene – erfolgen.

Die Modelle der physikalischen Effekte verknüpfen überwiegend abhängige Eigenschaften miteinander, bei vollständiger Ähnlichkeit kann durch Kenntnis des physikalischen Effekts die korrekte dimensionslose Kennzahl des Problems ausgewählt werden und die Skalierung auf dieser Basis durchgeführt werden. Dieser Zusammenhang ist jedoch eher für die Modellwissenschaft, weniger für die Baureihenentwicklung relevant, da letztere durch die Halbähnlichkeit einer größeren Informationsmenge zur Durchführung einer die Restriktionen beachtenden Skalierung bedarf. Die Ähnlichkeitskennzahlen dieser Abstraktionsstufe<sup>309</sup> können jedoch auch bei halbähnlichen Baureihen zum Abschätzen von Größenordnungen einzelner Parameter dienen.

---

### 6.2.2 Erstellen der SiM

---

Zusammen mit weiteren Submodellen für die Skalierung einzelner geometrischer und stofflicher Eigenschaften entstehen präzisere Skalierungsmodelle, welche in der SiM die relationalen Zusammenhänge liefern. Am Beispiel der Fahrt eines Lastkraftwagens über eine Brücke, siehe Abbildung 6.7, kann die Arbeit mit der SiM *auf konzeptueller Ebene* illustriert werden.

$$\varphi_{F,wirk} = \varphi_{m,Fz} = \varphi_L^{1/2} \quad (6.1)$$

Diese Einschränkung auf eine konzeptuelle Darstellung wird nötig, da selbst bei einfachen Systemen eine sehr große Anzahl von Relationen und Eigenschaften abgebildet werden muss, die auf zwei Ebenen – allgemein und maßstabsabhängig – miteinander wechselwirken. Dadurch können hier weder alle Eigenschaften, noch alle Relationen, noch eine genaue Beschreibung aller Relationen abgebildet werden: Diese Komplexität ist weder zweidimensional übersichtlich darzustellen, noch ist eine entsprechende Darstellung aus Platz- bzw. Lesbarkeitsgründen hier möglich. In der Praxis sollte eine SiM rechnergestützt auf Basis entsprechender Datenbanken oder Wissensmanagementsysteme aufgebaut werden. Relevant an dieser Stelle ist das prinzipielle Verständnis des Zusammenwirkens allgemeiner und maßstabsabhängiger Modelle.

Zunächst müssen die Modellmerkmale festgelegt werden. Abgebildet werden soll das System aus Brücke und Fahrzeug. Der Zweck des Modells ist das Generieren verschiedener Varianten unterschiedlicher Tragfähigkeit der Brücke, wobei Alterungseffekte und Ermüdung vernachlässigt werden, ebenso werden Umwelteinflüsse (zunächst) vernachlässigt – dies ist das Verkürzungsmerkmal. Der Pragmatismus des Modells findet sich in der Beschränkung auf die Berechnung der strukturellen

---

<sup>308</sup> Allgemein in Unterabschnitt 2.1.4 dargestellt, auf die Skalierung bezogen in Abschnitt 6.3 erweitert.

<sup>309</sup> Zusammenfassung der Geometrie auf eine charakteristische Länge, Nutzung charakteristischer Materialeigenschaften.



Festigkeit und Stabilität der Brücke im statischen Fall und unter Vernachlässigung von Effekten zweiter Ordnung.

Der zu realisierende Prozess ist das „Überqueren einer Schlucht“ innerhalb einer gewissen Zeit. Dazu wird das Verfahren „Fahren“ gewählt. Das Verfahren wird modellhaft charakterisiert durch das Bereitstellen eines Freiheitsgrades längs der gewünschten Bewegungsrichtung, das ermöglicht eine Vortriebskraft, sowie des Sperrens der Freiheitsgrade senkrecht zur Fahrtrichtung (Seitenführung und Absetzen der Gewichtskraft – das Erzeugen des Vortriebs ist im Operanden integriert und nicht mehr Teil des zu entwickelnden Arbeitsmittels „Brücke“, dieses übernimmt die Teilfunktion „Fahrzeug tragen“).

Der physikalische Effekt, der dieses Verfahren realisiert, ist hauptsächlich die COULOMB'sche Reibung. Durch Reibung können Antriebskräfte und Seitenführungskräfte übertragen werden, die Gewichtskraft sorgt als Normalkraft für den notwendigen Kraftschluss. Um ein Fahrzeug über eine Schlucht fahren zu lassen wird ein Festkörper benötigt, welcher die Gewichtskraft des Fahrzeugs ableiten kann, und gleichzeitig einen Reibkoeffizienten  $> 0$  bereitstellt.

Die bereitzustellende Wirkgröße ist hier die Reaktionskraft zur Gewichtskraft des Fahrzeugs. Da es sich – dynamische Effekte sollen an dieser Stelle vernachlässigt werden – um ein statisches Problem handelt, ist die bereitzustellende Reaktionskraft  $F_R$  am Brückenfundament gleich der Gewichtskraft des Fahrzeugs  $F_{g,Fz}$ , die Wirkgröße berechnet sich also wie folgt:

$$F_{\text{wirk}} = F_R = F_{g,Fz} = m_{Fz}g \quad (6.2)$$

Daraus leitet sich direkt das Wachstumsgesetz ab, nämlich

$$\varphi_{F,R} = \varphi_{m,Fz} \quad (6.3)$$

Für die Baureihe ist also direkt klar, dass die Wirkgröße direkt proportional mit der Fahrzeugmasse, welche sich aus den Geometrie- und Werkstoffeigenschaften des Operanden ableitet, skaliert. Damit ist die Prozessseite in Abbildung 6.6 modelliert.

Die Produktfunktion, vgl. Abbildung 6.7 d), liefert wie besprochen keinen Hinweis auf die Skalierung des Arbeitsmittels. Der bei der Kraftleitung zugrundeliegende physikalische Effekt ist zum einen der Formschluss in Richtung der Schwerkraft zwischen dem Wirkflächenpaar Straßenoberfläche und Reifenaufstandsfläche und die daraus resultierende Flächenpressung, sowie die elastische Verformung der Brücke, welche zu Spannungen im Material führt.<sup>310</sup> Über den Vergleich der wirkenden Spannungen mit der Festigkeit,  $F_R/A_{\text{Pfeiler}} \leq R$ , kann die Tragfähigkeit abgesichert werden. Dabei ist das Wirkprinzip die Bereitstellung einer Reaktionskraft durch Verformung eines Druckstabes, die Querschnittsfläche des Pfeilers  $A_{\text{Pfeiler}}$  ist eine aus Breite und Tiefe des Pfeilers abgeleitete Geometrieeigenschaft, während die Querschnittsform im Geometriemodell hinterlegt ist, die Festigkeit  $R$  ist eine Werkstoffeigenschaft.

Die Skalierung der elastischen Verformung der Brücke wird über die HOOKE'sche Kennzahl beschrieben, es folgt, dass bei gleichem Material alle Abmessungen der Brücke proportional wachsen müssen, wenn Brücken mit anderer Tragfähigkeit abgeleitet werden sollen. Hier stellt  $Ho$  die maßgebende Ähnlichkeitskennzahl des Operanden dar, und (6.1) das Wachstumsgesetz mit Bezug zur Wirkgröße als Skalierungsbasis der Transformationen im System. Es ist formuliert mit dem Stufensprung der Länge und der Fahrzeugmasse als Eigenschaften von Operator und Operand.

<sup>310</sup> An dieser Stelle kann dem Pragmatismusmerkmal des Modells hinzugefügt werden, dass die Betrachtung der Flächenpressung aus Erfahrung als irrelevant angesehen werden kann, und daher nicht abgebildet wird.



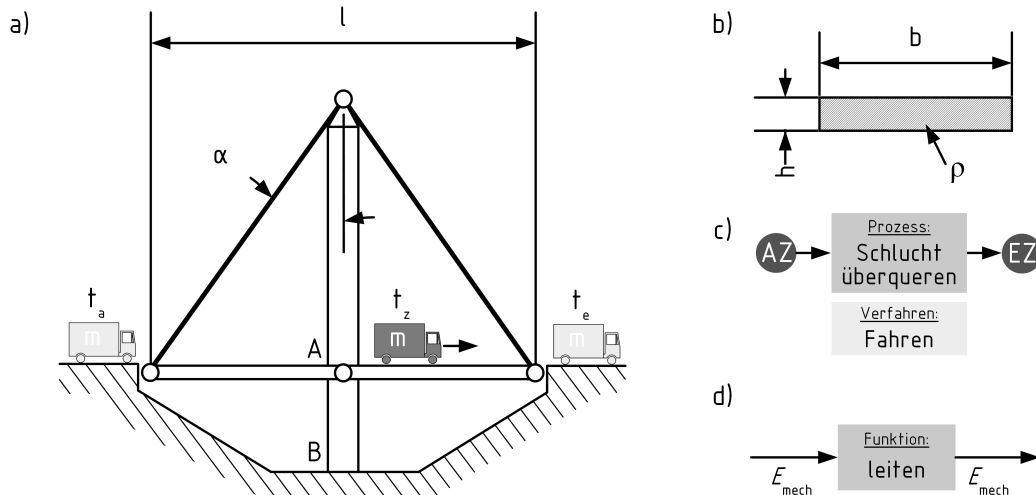


Abbildung 6.7: Beispiel zum Aufbau einer Skalierung integrierenden Modellwelt. a) Brücke mit Lastkraftwagen, elementare Eigenschaften von Operand und Arbeitsmittel. b) Querschnitt der Brücke. c) Prozess und gewähltes Verfahren. d) Funktion des Arbeitsmittels.

Damit ist die Skalierung integrierende Modellierung der Brücke unter den genannten Aspekten abgeschlossen. Dieses Vorgehen bedürfte keiner neuen Modellwelt, es ist letztlich stand der Technik.

Interessant wird es jedoch, wenn zusätzliche skalierungskritische Effekte abgebildet werden müssen, weil der Gültigkeitsbereich von  $Ho$  als Skalierungsmodell verlassen wird, Stichwort Eigengewicht. Wird dieses nicht berücksichtigt, liegt eine große Skalierungsmodellunsicherheit vor, die mit den in den nächsten Kapiteln, insbesondere den Abschnitten 7.2 und 7.3, beschriebenen Modellen und Methoden als für das Problem relevant identifiziert werden kann.

Klassischerweise ist es so, dass weitere Anforderungen an die Brücke gestellt werden. So darf die Brücke nicht beliebig in die Höhe wachsen, genauso wie die Höhe i.A. nicht per geometrischer Ähnlichkeit an die Spannweite gekoppelt sein wird. Dies hat Auswirkungen beispielsweise auf die Seilkräfte in den Abspannungen, die ebenfalls nachgewiesen werden müssen und dafür in die Modellwelt integriert werden müssen. Für den Fall des gerade auf Höhe der Seilbefestigung fahrenden Lastkraftwagens (Worst Case für die Seile) ergibt sich die Seilkraft infolge der Fahrzeugmasse zu

$$F_S = mg(1 - \cot(\alpha)) \quad (6.4)$$

und kann, da geometrische Ähnlichkeit aus o.g. Gründen nicht vorausgesetzt werden kann, damit nicht mehr unmittelbar in ein Wachstumsgesetz überführt werden. Bereichsweise ist dies über die Approximation mit Exponentengleichungen aber möglich, vgl. Abschnitt 6.1.

Auch die Wirkung der – i.d.R. dominierenden<sup>311</sup> – Beanspruchung aus dem Eigengewicht der Brücke muss berücksichtigt werden.

<sup>311</sup> Geht man davon aus, dass die Masse der Fahrbahn gegenüber der Masse des Fahrzeugs dominiert, wird Gleichung 6.1 zu  $\varphi_{F,wirk} = \varphi_{m,Fz} = \varphi_L^{1/3}$ , was einem Wechsel der Wachstumsexponenten entspricht und damit einem Wechsel des Skalierungsbereichs und -modells (vgl. S. 89). Es gibt also für die Brücke potenziell drei Skalierungsbereiche: Fahrzeugmasse dominiert über die Brückenmasse, das kann bei sehr kleinen Brücken der Fall sein; Fahrzeugmasse und Brückenmasse liegen in ähnlichen Größenordnungen, sowie drittens:  $m_{Fb} \gg m_{Fz}$ . Die Fälle 1 und 3 lassen sich in ein Wachstumsgesetz abbilden, bei Fall 2 bietet sich die parametrische Modellierung am Rechner für die Skalierung an.

An dieser Stelle versagt  $Ho$  als Skalierungsmodell, die Skalierungsmodellunsicherheit wird unzulässig hoch. Der Einfachheit halber soll im Folgenden von einer mittleren Dichte  $\rho$  der Fahrbahn und dem vereinfachten Querschnitt aus Abbildung 6.7 b) ausgegangen werden. Weiterhin wird angenommen, dass die Fahrbahn starr sei.<sup>312</sup> Damit erhöht sich die Beanspruchung im Brückenpfeiler um den Term  $h_{\text{Fb}}b_{\text{Fb}}l\rho g/A_{\text{Pfeiler}}$ .

Die Biegebelastung des Brückenpfeilers infolge der Seilkraft ist wiederum – eine Behandlung nach Theorie erster Ordnung und Symmetrie der Brücke vorausgesetzt – nur von der Fahrzeugmasse abhängig, und entspricht  $M_b = mgl / (2 \tan(\alpha))$ .

Die Ressource<sup>313</sup> setzt sich aus den in das Fundament B ausgeleiteten Kräften und Momenten zusammen, welche sich durch Superposition der Belastungen aus Fahrzeugmasse und Fahrbahnmasse zu

$$\begin{aligned} F_B &= (m + h_{\text{Fb}}b_{\text{Fb}}l\rho) g \\ M_{b,B} &= \frac{mgl}{2} \end{aligned} \tag{6.5}$$

zusammen.

Aus den drei möglichen Fällen, vgl. Fußnote 311, lassen sich nun drei mögliche dimensionsbehaftete Modellebenen sowie drei Skalierungsmodellebenen der SiM bilden, wobei die mittlere, parametrische Skalierungsmodellebene der dimensionsbehafteten Modellebene unter Berücksichtigung aller zusätzlichen Einflüsse aus Eigengewicht entspricht – die Notwendigkeit, entsprechend genau zu modellieren, leitet sich jedoch aus der Analyse des Gültigkeitsbereichs der Skalierungsmodelle ab:

*Wenn eine Variante eine Vernachlässigung der Fahrbahnmasse erlaubt, kann durch eine Analyse der Grenzen des benutzten Modells entschieden werden, ob für den angepeilten Skalierungsbereich die Modellwelt um zusätzliche Einflüsse, hier das Eigengewicht der Fahrbahn, erweitert werden muss. Diese skalierungsbereichsweise Modellierung ist in Abbildung 6.8 dargestellt.*

Die Darstellung eines größeren Ausschnitts einer SiM ist in Abbildung 6.9 zu sehen. Zu beachten sind hier die Wechselwirkungen zwischen Prozess und einzelnen Elementen (Funktion, Effekt, Bauteil, Gestalteigenschaft) des Produkts. Als Störgrößen können natürlich weitere Einflüsse wie z.B. dynamische Windlasten wirken.

*Die Skalierung integrierende Modellwelt bildet mit der integrierten Darstellung aller für die jeweilige Problemstellung relevanten Eigenschaften und Relationen in allen für das Problem relevanten Maßstäben die Grundlage für die Analyse von Baureihen und stellt damit die Informationen für einen Syntheseprozess bereit.*

---

### 6.3 Ein Prozessmodell für die Baureihenentwicklung

---

Da die nBRE über die Betrachtung des Produkts hinausgeht, indem sie den skalierten Prozess in den Mittelpunkt stellt, vgl. Abschnitt 4.3, wird ein Modell zur Analyse der Baureihe-Prozess-Relationen benötigt. Dieses wird im folgenden Abschnitt erläutert, im Anschluss werden Hinweise zur Arbeit mit diesem Modell gegeben.

---

<sup>312</sup> Diese Annahme ist für reale Brücken nicht zutreffend, jedoch soll an dieser Stelle keine Abhandlung über die Elastostatik entstehen, sondern nur das grundsätzliche Vorgehen beim Abbilden von Modelleffekten in eine zur Skalierung geeignete Modellwelt verdeutlicht werden.

<sup>313</sup> Dieser Begriff wird im Vorgriff auf die Modellierung skalierten Prozesse, beschrieben in Abschnitt 6.3, verwendet.

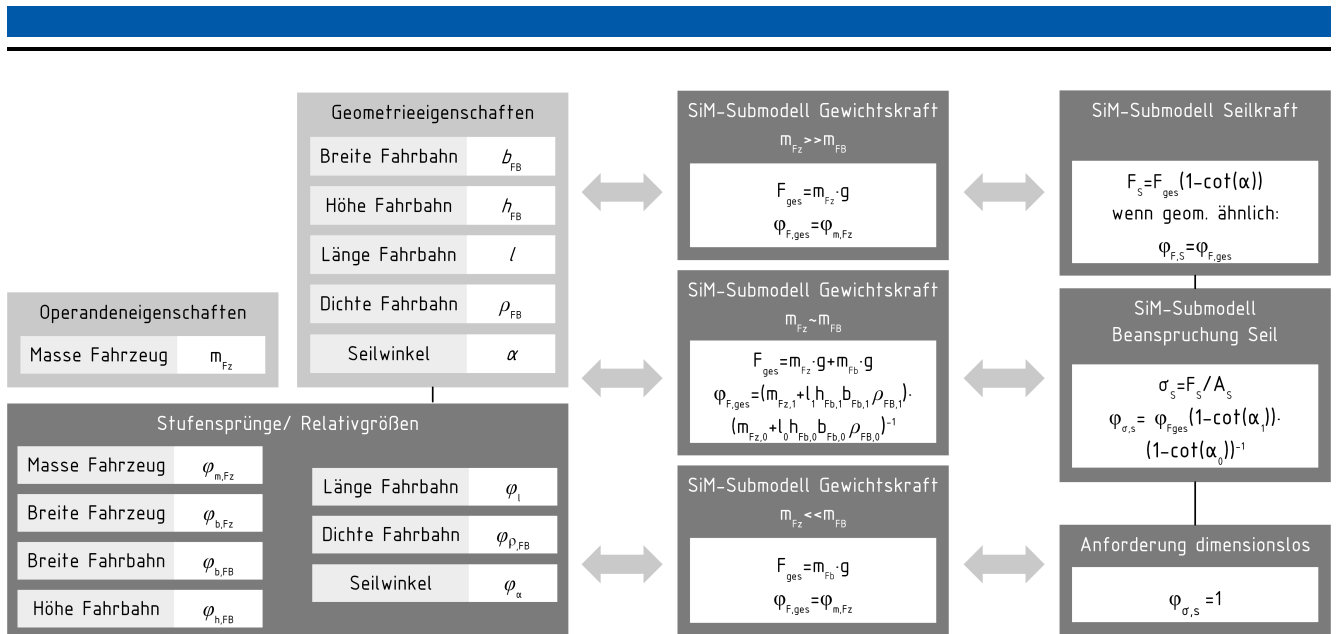


Abbildung 6.8: Drei Skalierungsbereiche in der SiM einer Brücke, Teilbereich „Modellierung der Tragfähigkeit der Abspannung“.

### 6.3.1 Aufbau des Prozessmodells für Prozesse in der nBRE

Grundlage der Analyseprozesse in der nBRE ist die gemeinsame Betrachtung von Produkt und Prozess als Grundlage der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung sowie der Beherrschung von Unsicherheit, vgl. S. 10, Unterabschnitt 2.1.4 sowie Abschnitt 2.3. Das nachfolgend vorgestellte Modell basiert auf dem von FREUND ET AL. zur detaillierteren Modellierung des Arbeitsmittels weiterentwickelten Prozessmodell – das Arbeitsmittel wird bereits im Prozessmodell nach HEIDEMANN als Blackbox modelliert – und dem vom Autor bereits auf die Skalierung der Wirkgröße erweiterten Modell zur Beschreibung technischer Prozesse.<sup>314</sup>

Dabei berücksichtigen die o.g. Prozessmodelle zwar Interaktionen zwischen verschiedenen Systemelementen, die Aufbereitung dieser Informationen ist jedoch noch nicht weiter konkretisiert. Auch darüber, welchen Nutzen verschiedene Konkretisierungsgrade des Arbeitsmittels im Prozessmodell für die Baureihenentwicklung haben, liegt noch kein Wissen vor.

Die Struktur der existierenden Prozessmodelle wird daher um die strukturierte Repräsentation skalierungsrelevanter Informationen erweitert. Dies sind insbesondere Relationen und Maßstabsabhängigkeit von Eigenschaften und ihrer Varianz. Das Prozessmodell zur nBRE ist an Abbildung 6.10 zu sehen.

Die augenfälligste Veränderung betrifft die Darstellung von Prozessketten. Prozessketten mit gleichbleibendem Arbeitsmittel müssen nicht in einem je Teilprozess abgeschlossenen Modell dargestellt werden. Neben dem Verzicht auf redundante Modellierung wird die Übersicht über die Teilprozesse übergreifende Beeinflussung von Eigenschaften erleichtert. Ein Beispiel für solche Einflüsse ist der Verschleiß eines Werkzeugs, welcher in einem nachgelagerten Prozess zu erhöhter Varianz von Operandeneigenschaften führt. Es muss erwähnt werden, dass unterschiedliche Teilprozesse unterschiedliche Wirkgrößen bedingen können, und dass daher die Wirkgröße für verschiedene Teilprozesse von verschiedenen Produktelementen realisiert werden kann.

Stör- und Nebengrößen sowie Interaktionen, im Folgenden Relationen genannt, zwischen Prozess, Ressourcen, Umwelt, Nutzer und Produktelementen werden gesammelt. Produktelemente können

<sup>314</sup> FREUND ET AL. 2014, HEIDEMANN 2001 und LOTZ ET AL. 2015

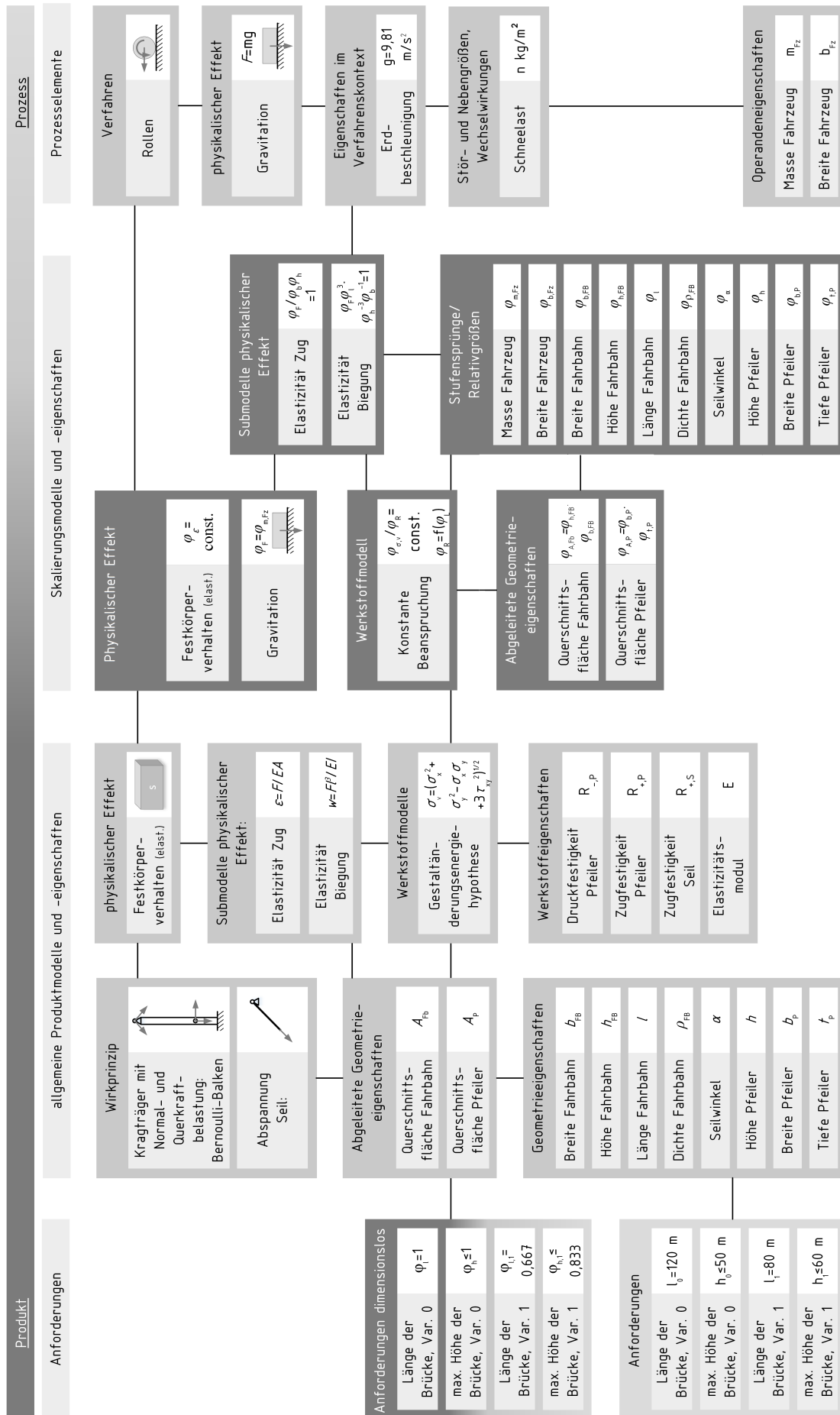


Abbildung 6.9: Einfache SiM für das Beispiel der Brücke. Erweiterung der Modellwelt auf Basis der Analyse der Skalierungseffekte.

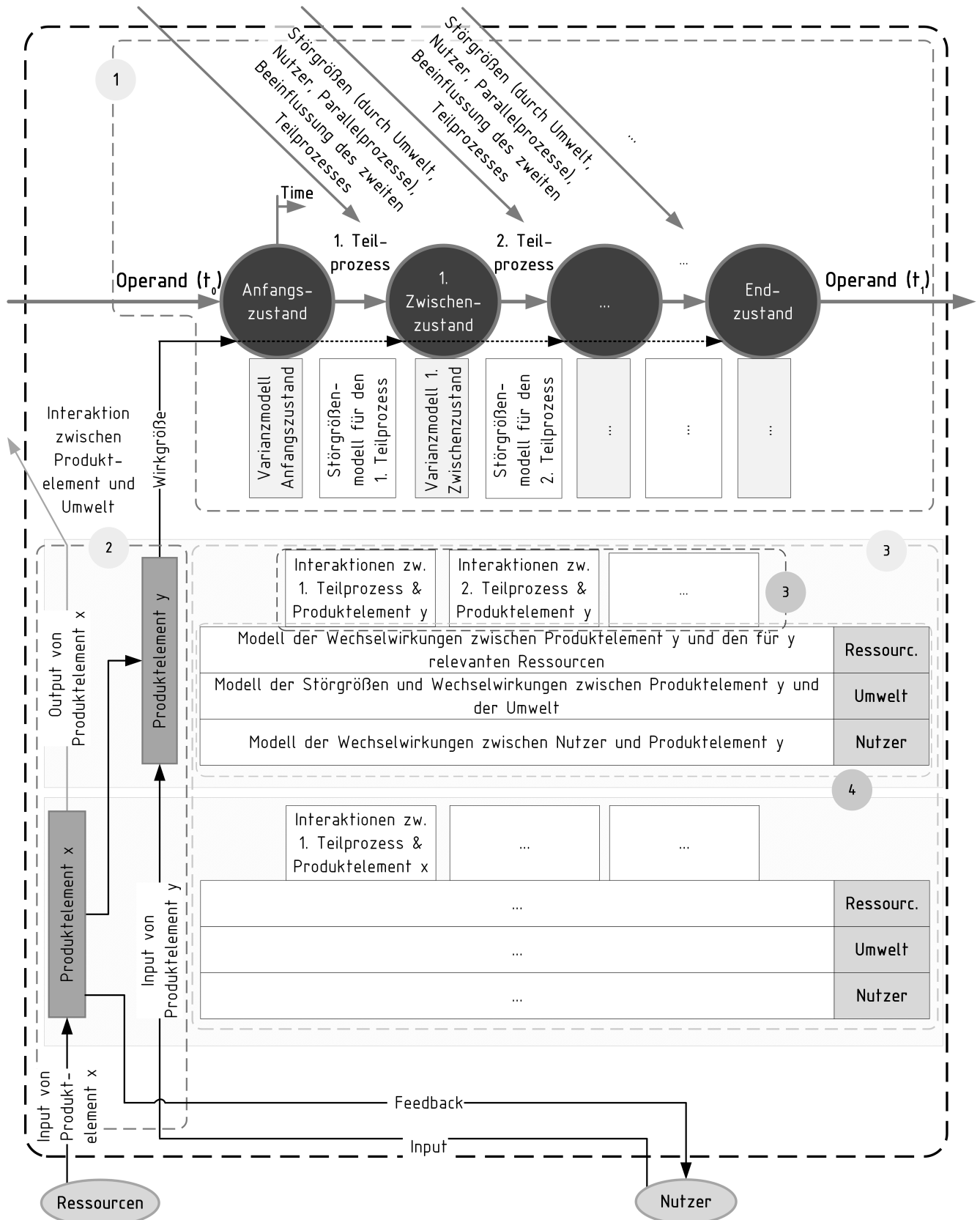


Abbildung 6.10: Prozessmodell zur Analyse größenabhängiger Einflüsse. 1) Prozesskette, Einflüsse auf den Prozess, 2) Arbeitsmittel, 3) Relationen zwischen Arbeitsmittel und Prozess, 4) Relationen zwischen Umgebung und Arbeitsmittel.

je nach Konkretisierung des Produkts Funktionen, Gestaltungszonen, Bauteile oder Produkteigenschaften sein. Sofern vorhanden können auch die Modelle für die jeweilige Interaktion hinterlegt werden.

### 6.3.2 Arbeiten mit dem Prozessmodell für Prozesse in der nBRE

Das Prozessmodell ist auch als Moderationshilfe in Workshops angelegt – eine Prozessanalyse findet oft interdisziplinär statt – einfache Modelle können hier gesammelt und im erweiterten Prozessmodell, Abbildung 6.10, dokumentiert werden. Unterstützt werden kann die Arbeit mit dem Prozessmodell durch den Einsatz von Checklisten (Stör- und Nebengrößencheckliste,<sup>315</sup> vgl. Abbildung 6.11) und Methoden wie der Analyse der Produktumgebung<sup>316</sup>. Eine umfassende Dokumentation der Modelle findet zweckmäßigerweise in der Skalierung integrierenden Modellwelt bzw. rechnergestützt (PLM-Systeme) statt. Beiden Möglichkeiten ist gemeinsam, dass sie einen Zugriff auf alle für die Antizipation des Produktverhaltens relevanten Modell erlauben. Dies ist insbesondere von Vorteil, wenn Unsicherheit durch Modelleffekte durch eine realitätsnähere Modellierung des skalierten Systems verringert werden soll. Das Prozessmodell selbst dient nicht als Wissenspeicher, sondern insbesondere als mentales Modell zur Analyse von Systemen mit hoher Zahl an Interaktionen, insbesondere zur Identifikation von Interaktionen.







































Kombination 1		Störgrößen										
Teilverhalten		Wärme- zufuhr/- abfuhr	Schlag	Flüssig- keit	Elektri- sches Feld	Magnetis- ches Feld	Staub	Luft- feuchtig- keit	Licht	Partikel	Sonnen- licht/UV- Strahlung	Be- schleuni- gung
Energie wandeln	Photoelektr. 											
Energie speichern	Akku 											
Takt geben	Piezoelektr. 											
Signal wandeln/ umformen	El. Schaltung  Verstärker/Zähler											
Zeit anzeigen	LCD-Display 											

Abbildung 6.11: Ausschnitt aus dem Störgrößenportfolio. Aus MATHIAS 2016, S. 144 ff., S.162 ff.

Die Maßstabsabhängigkeit von Relationen wird im Rahmen der Analyse technischer Systeme mit dem Prozessmodell kontinuierlich überprüft. Zu Beginn der Analyse ist davon auszugehen, dass alle Relationen potenziell skalierungsrelevant sind, weil nicht bekannt ist, welche Auswirkungen eine Maßstabsabhängigkeit des relativen Verhaltens auf das technische System hat. Wird eine neu konkretisierte Lösung im Prozesskontext analysiert, also der Abgleich von Ist- zu Soll-Eigenschaften durchgeführt, vgl. Abbildung 5.6, reicht es in Bezug auf die Skalierung, die Relationen zu betrachten, die sich von der die Skalierung dominierenden Relation unterscheiden. Relationen, die bspw.

<sup>315</sup> Vgl. MATHIAS 2016, S. XVI ff.

<sup>316</sup> Vgl. ROTH 2000, S. 67 ff.



---

einen in Bezug auf dieselbe Eigenschaft vom Modell des dominierenden Effekts abweichenden Wachstumsexponenten aufweisen, entsprechend den Modelleffekten, die SPURK beschreibt.<sup>317</sup>

Dies wird am Biegebalken deutlich, der sich sowohl unter seinem Eigengewicht als auch unter einer äußeren Last verformt. Setzt man die Kraftähnlichkeit zwischen elastischen und äußeren Kräften voraus, skaliert also nach der HOOKE-Zahl, vgl. (2.14) und Unterabschnitt 2.2.4, folgt das quadratische Wachstum der zulässigen äußeren Kräfte beim geometrisch ähnlich skalierenden Balken gleichen Materials. Die Gewichtskraft, die den Balken zudem belastet, wächst unter gleichen Voraussetzungen kubisch, die Relation dieser Kräfte weicht in Bezug auf die Größenabhängigkeit also von der des dominierenden Effekts, dem Tragen äußerer Lasten, ab. Die Gesamtdurchbiegung wird dadurch bei der Vergrößerung des Balkens schneller anwachsen, als es im idealisierten Skalierungsmodell der HOOKE-Zahl (masselose Tragstruktur) der Fall ist.

Eine gleich skalierende Größe, beispielsweise die Größe der Oberfläche des Balkens – und beispielsweise die zu ihr näherungsweise proportionalen Kosten für eine Oberflächenbehandlung – wächst ebenfalls quadratisch mit der Länge und damit proportional zur Tragfähigkeit in Bezug auf äußere Lasten (bei vernachlässigbarem Eigengewicht). Das Wachstum von Tragfähigkeit der Struktur verhält sich also ähnlich zum Wachstum der Oberflächenbehandlungskosten, hier kommt es nicht zu einer Abweichung eines KPI wie z.B. den Lackierkosten pro  $N$  ertragbarer Last.

Ein Beispiel für die Auswirkung abweichender Relationen zwischen Eigenschaften in Skalierungsmodellen in einem dynamischeren Prozess als dem Last tragen bietet die Absorption von Licht in einem Medium, beispielsweise bei der Abstandsmessung per Laser. Durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Lauflänge und benötigter Strahlungsintensität hat eine Schwankung der Stoffeigenschaften des Umgebungsmediums, beispielsweise durch eine Temperaturänderung im Tagesverlauf, eine unterschiedlich starke Auswirkung auf verschiedene Baugrößen. Die Herleitung und eine Abbildung dieses Beispiels befinden sich in Anhang E. Diese Relation zwischen über die Skalierung hinweg gleicher Varianz der Temperatur und der Lichtintensität weicht von der Relation zwischen Lauflänge und Lichtintensität ab, sie ist daher zur Beherrschung von Unsicherheit zu beachten.

Die Existenz dieser Relation wird durch das Prozessmodell für den Entwickler ersichtlich (Identifikation von Unsicherheit), vergleiche hierzu das Vorgehen zur Unsicherheitsreduktion bei der Skalierung, Abschnitt 7.2. Die Wechselwirkung selbst und ihr zugehöriges Wachstumsmodell können in verschiedenen Bereichen des Prozessmodells eingeordnet werden, je nach Konkretisierungsstufe des Operators. Sind nur die Effekte bekannt, betrifft die Temperaturänderung als Störgröße den (Teil-)Prozess, welcher den Messprozess repräsentiert, also in Bereich 1 des Modells. Liegt bereits eine Funktionsstruktur vor, wird die Relation in Bereich 4 des erweiterten Prozessmodells bei den Störgrößen aus der Umwelt, welche auf ein Produktelement wirken, eingeordnet, und zwar bei der Funktion, die für das Sensieren des wieder einfallenden Lichts zuständig ist. Liegt bereits eine Baustuktur vor, wird sie dem Produktelement „Sensor“ zugeordnet. Äquivalent wird mit allen weiteren Systemelementen verfahren.

*So entsteht im Laufe der Analyse ein Modell, in dem alle Einwirkungen auf Elemente und deren Auswirkungen im System, also auf Operator, Operand und Prozess, dargestellt sind. Auch Varianz kann in den Eigenschaften von Operand, Operator oder der Beschreibung der Relationen dargestellt werden.*

Zusammengefasst sind die Schritte also das Erstellen einer Prozesskette (Bereich 1 in Abbildung 6.10), welche Im Laufe des Entwicklungsprozesses weiter unterteilt werden kann, falls notwendig.

---

<sup>317</sup> Vgl. SPURK 1992, S. 63 f.



---

Im Fall einer Anpassung der Prozesskette müssen auch die Relationen zwischen den Teilprozessen und Produkt und Umwelt aktualisiert werden.

Der zweite Schritt ist die Festlegung der Produktelemente, abhängig vom Konkretisierungsgrad des Produkts (Bereich 2). Es entstehen bis zu vier finale Prozessmodelle: Eines auf Ebene der Funktionen zur Identifikation möglicherweise skalierungsrelevanter Flussgrößen und die Baureihen-Baukasten-Entwicklung, eines für die Baustuktur auf Ebene der Gestaltungszonen, optional eines auf Ebene der Bauteile für die kombinierte Baukasten-Baureihen-Entwicklung und eines auf der Ebene unabhängiger Eigenschaften, sofern der erwartete Erkenntnisgewinn den hohen Modellierungsaufwand rechtfertigt.

---

## 6.4 Abbildung von größenabhängigen Eigenschaften und Relationen

---

Das Verständnis, dass Relationen zwischen Eigenschaften von zentraler Bedeutung für Beschreibung und Analyse technischer Systeme sind, wird schon von PAWLOWSKI etabliert; er kommt zu dem Schluss, dass neben den physikalischen Größen ein erheblicher Erkenntniswert in den Relationen zwischen ihnen liegt.<sup>318</sup> Die Invarianz dieser Relationen erlaubt erst die Berechnung und mithin die Skalierung physikalischer Effekte.<sup>319</sup> Jedoch ist, wie bereits im Abschnitt 3.3 angesprochen, die Relation selbst nicht immer bekannt, oder das reale technische System ist nicht physikalisch ähnlich, da die Effekte nicht identisch sind. Das ist beispielsweise beim Umschlag einer laminaren Strömung in eine turbulente Strömung bei einem vergrößerten Entwurf der Fall, woraufhin sich Wachstumsexponenten als Ausdruck der variierenden Relation ändern.

An dieser Stelle soll im Rückgriff auf verschiedene eigene Veröffentlichungen und auch neue Arbeiten eine Erweiterung der etablierten Beschreibung größenabhängiger Relationen und Eigenschaften auf die Beschreibung von ungewollten Zusammenhängen (Stör- und Nebengrößen, Unsicherheit) vorgenommen werden. Dies geschieht durch die Verwendung von Stufensprüngen, dimensionslosen Kennzahlen und Wachstumsgesetzen.

### Größenabhängige Relationen - Ähnlichkeitsbeziehungen

Zentrales auf Ähnlichkeitsbeziehungen basierendes Modell zur Beschreibung maßstabsabhängiger Eigenschaften sind die – oft dimensionsanalytisch gewonnen – Ähnlichkeitskennzahlen, vgl. auch Unterabschnitt 2.2.4. Sie eignen sich, um Skalierungsmodelle anhand von Relevanzlisten aufzustellen, was hinreichend in der Literatur und im vorgenannten Kapitel beschrieben ist.<sup>320</sup>

Im Rahmen dieser Arbeit sind Ähnlichkeitsbeziehungen von hohem Interesse, die die Beschreibung von maßstabsabhängiger Unsicherheit erlauben. Ein Vorgehen zur Genese dimensionsloser Kennzahlen zur Unsicherheitsskalierung beschreiben VERGÉ ET AL. Das Modell soll hier knapp wiedergegeben werden.<sup>321</sup> Bei dimensionslosen Produkten erfolgt dies über die differenzierte Skalierung von Eigenschaft und Schwankung der jeweiligen Eigenschaft  $p$  (für alle folgenden Gleichungen gilt  $j = 1 \dots n$  und  $i = 1 \dots d$ ):

$$\tilde{p}_j = p_j \pm \Delta p_j, \quad (6.6)$$

hier ist die skalierte Eigenschaft  $p_j$  mit dem Skalierungsfaktor  $M_j$  aus der Eigenschaft im Modellmaßstab  $p_{0j}$  zu ermitteln:

---

<sup>318</sup> Vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 1.

<sup>319</sup> Vgl. PAWLOWSKI 1971, S. 2.

<sup>320</sup> Vgl. u.a. STICHLMAIR 1990, für komplexere Probleme PELZ und VERGÉ 2014 oder MADAN 2006.

<sup>321</sup> Vgl. VERGÉ ET AL. 2015, S. 104 f.

$$p_j := M_j * p_{0j} \quad (6.7)$$

wobei für die Unsicherheit ( $U$ )  $U_j \equiv \Delta p_j / p_j$  gilt; damit kann der tatsächliche, varianzbehaftete Wert des Merkmals als

$$\tilde{p}_j = p_j (1 \pm U_j) \quad (6.8)$$

geschrieben werden. Daraus folgt, äquivalent zum  $\Pi$ -Theorem, vgl. Unterabschnitt 2.2.2, für  $d = n - r$  das Problem beschreibende, varianzbehaftete dimensionslose Produkte, vgl. (2.9):

$$\tilde{\Pi}_i = \prod_{j=1}^n \tilde{p}_j^{k_{(i),j}} \quad (6.9)$$

sowie

$$\tilde{\Pi}_i = \Pi_i \prod_{j=1}^n (1 \pm U_j)^{k_{(i),j}} \quad (6.10)$$

und für den Grundentwurf bzw. das Modell

$$\tilde{\Pi}_{0i} = \Pi_{0i} \prod_{j=1}^n (1 \pm U_{0j})^{k_{(i),j}} \quad (6.11)$$

Für die Skalierung folgt, mit Skalierungsfaktoren  $M^{k_{(i),j}}$  geschrieben

$$1 = \prod_{j=1}^n \tilde{M}_j^{k_{(i),j}} = \prod_{j=1}^n M_j^{k_{(i),j}} \prod_{j=1}^n (1 \pm U_j)^{k_{(i),j}} \quad (6.12)$$

Da  $\prod_{j=1}^n M_j^{k_{(i),j}} = 1$  folgt als Ergebnis der Unsicherheitsskalierung

$$1 = \prod_{j=1}^n (1 \pm U_j)^{k_{(i),j}}, \quad (6.13)$$

womit sich für alle dimensionsanalytisch lösbaren Probleme auch die Unsicherheit beschreibende Kennzahlen bilden lassen. Diese können in Rahmen der SiM zur Beschreibung und Analyse von Systemen verwendet werden, insbesondere bei der Analyse der skalierten, unsicherheitsbehafteten Ist-Eigenschaften, vgl. Unterabschnitt 5.4.2.

## Größenabhängige Relationen - Wachstumsgesetze

Über Ähnlichkeitskennzahlen hinaus können auch Wachstumsgesetze zur Beschreibung von Unsicherheit herangezogen werden. Hierzu existieren Veröffentlichungen für das Aufstellen von *Szenario-Wachstumsgesetzen* zur Repräsentation von Best- und Worst-Cases der Werte einer varianzbehafteten Eigenschaft  $p \pm \Delta p$ <sup>322</sup>, sowie zur Beschreibung dynamischer Vorgänge, welche Varianz erzeugen ( $p \pm \Delta p = f(t)$ )<sup>323</sup>.

Auch hier werden Produkteigenschaft und Varianz getrennt voneinander skaliert, wodurch unterschiedliche Wachstumsexponenten von Varianz und Bezugsgröße möglich sind:

$$\varphi_{\Delta p} = \frac{\Delta p, 1}{\Delta p, 0}, \quad \varphi_p = \frac{p, 1}{p, 0}, \quad (6.14)$$

woraus folgt, dass der mit Unsicherheit behaftete Stufensprung zu

$$\widetilde{\varphi}_p = \varphi_p \pm \frac{\varphi_{\Delta p} \cdot \Delta p_0}{p_0} \quad (6.15)$$

wird.

Aus diesen Eigenschaften lassen sich dann Szenario-Wachstumsgesetze ableiten, beispielsweise für die kritische Last einer halbähnlich zu skalierenden, stabilitätsgefährdeten längsdruckbeanspruchten Platte.<sup>324</sup> Das zugehörige Wachstumsgesetz leitet sich zu

$$\varphi_{F,kr} = \frac{\varphi_E \varphi_t^3}{\varphi_b} \quad (6.16)$$

angeben. Hieraus können Unsicherheitswachstumsgesetze abgeleitet werden:

$$\widetilde{\varphi}_{F,kr} = \frac{\widetilde{\varphi}_{E,min} \widetilde{\varphi}_{t,min}^3}{\widetilde{\varphi}_{b,max}} \quad (6.17)$$

Gleichung (6.17) ist ein Beispiel für ein Worst-Case-Wachstumsgesetz, in welches dann die mit Unsicherheit behafteten Stufensprünge aus (6.15) eingesetzt werden. Für stochastische Unsicherheit lassen sich Wachstumsgesetze für die Standardabweichung einer Eigenschaft approximieren. Hierzu sind jedoch von den Relationen des Modells und der Art der Verteilungen abhängige Faltungsintegrale zu lösen, was zumeist numerisch durch Monte-Carlo-Simulationen gelöst wird, hierzu siehe Unterabschnitt 7.3.1.

Unsicherheitswachstumsgesetze lassen sich auch, für verschiedene Szenarien oder umfangreiche Modelle mit Submodellen, vektoriell schreiben und verarbeiten. Dies kann insbesondere für den Aufbau von Teilen der bMDM, vgl. Abschnitt 6.5, und die rechnergestützte Verarbeitung von Wachstumsgesetzen relevant sein. Sie können mit der Wachstumsgesetzmatrix  $\mathbf{A}_{WG}$  und  $m$  als Anzahl der Szenarien<sup>325</sup> sowie dem Szenariovektor  $\vec{\varphi}_0$  allgemein als

<sup>322</sup> Vgl. LOTZ ET AL. 2014.

<sup>323</sup> Vgl. LOTZ und KLOBERDANZ 2014.

<sup>324</sup> Für Anzahl der Längshalbwellen soll gelten  $m > 3$ , womit das Länge-Breite-Verhältnis ebenfalls zu etwa  $a/b > 3$  werden muss. In diesem Fall lässt sich entsprechend der „Girlandenkurve“ in sehr guter Näherung mit einem Beulwert von 3,62 (minimaler Beulwert einer Platte) rechnen, d.h. auch bei einer Änderung des Länge-Breite-Verhältnisses (Halbähnlichkeit) genügt ein einfaches Wachstumsgesetz. Bei  $m < 3$  muss zusätzlich ein Wachstumsgesetz für den Beulwert abgeleitet werden, vgl. Vgl. WIEDEMANN 2007, S. 65.

<sup>325</sup> Oftmals ist  $m = 2$  oder  $m = 3$ , für Worst-Case und Nominalwert oder Best-, Worst-Case und Nominalwert.

$$\vec{\tilde{s}}_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot \vec{\tilde{s}}_0 \quad (6.18)$$

geschrieben werden. Am Beispiel einer durch Fertigungstoleranz mit Unsicherheit behafteten geometrischen Eigenschaft  $l$  kann die Modellierung verdeutlicht werden. Der durch das unterproportionale Wachstum von Fertigungstoleranzen (mit Exponent  $1/3^{326}$ ) hervorgerufene Modelleffekt wird durch die separate Modellierung von Soll-Eigenschaft  $(l, \phi_1)$  und Unsicherheit berücksichtigt. Daraus folgend stellt sich die Wachstumsgesetzmatrix einer geometrisch gestuften Baureihe mit  $n$  Gliedern so dar:

$$\mathbf{A}_{\text{WG,L}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ \varphi_L & 0 & 0 \\ \varphi_L & \varphi_L^{1/3} & 0 \\ \varphi_L & 0 & \varphi_L^{1/3} \\ \varphi_L^2 & 0 & 0 \\ \varphi_L^2 & \varphi_L^{2/3} & 0 \\ \varphi_L^2 & 0 & \varphi_L^{2/3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_L^n & 0 & 0 \\ \varphi_L^n & \varphi_L^{n/3} & 0 \\ \varphi_L^n & 0 & \varphi_L^{n/3} \end{bmatrix}, \quad (6.19)$$

der Szenariovektor (ein Nominal/Best-/Worst-Case-Szenariobündel) für Eingangsdaten der Skalierung lautet

$$\vec{\tilde{s}}_0^T = \begin{pmatrix} L_0 & \Delta L_0 & -\Delta L_0 \end{pmatrix}, \quad (6.20)$$

womit die Unsicherheitsmatrix eines skalierten Entwurfs nach (6.19) zu

$$\begin{pmatrix} L_i \\ L_{i,\max} \\ L_{i,\min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_0 \\ \Delta L_0 \\ -\Delta L_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_L^i & 0 & 0 \\ \varphi_L^i & \varphi_L^{i/3} & 0 \\ \varphi_L^i & 0 & \varphi_L^{i/3} \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

wird. Sie liefert mit (6.18) den Szenariovektor des skalierten Entwurfs:

$$\vec{\tilde{s}}_i = \begin{pmatrix} L_i \\ \Delta L_i \\ -\Delta L_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_0 \varphi_L^i \\ L_0 \varphi_L^i + \Delta L_0 \cdot \varphi_L^{i/3} \\ L_0 \varphi_L^i - \Delta L_0 \cdot \varphi_L^{i/3} \end{pmatrix} \quad (6.22)$$

<sup>326</sup> Vgl. DIN EN ISO 286-1 2010, S. 25 ff.

Ändern sich Relationen in den Skalierungsmodellen bereichsweise, wie in Unterabschnitt 5.4.2 angesprochen, lassen sich die Relationen zwischen Elementen des technischen Systems formalisiert in Relationsmengen abbilden. Notwendig werden unterschiedliche Relationsmengen durch Unstetigkeiten in den Skalierungsgesetzen, beispielsweise bei diskreter zahlenmäßiger Stufung von Elementen (6, 8, 10 Schrauben über den Umfang einer Flanschverschraubung), beim je nach Baugröße laminaren oder turbulenten Betrieb eines hydrodynamischen Gleitlagers o.Ä.). In diesen Fällen ändern sich die Relationen zwischen Produkteigenschaften und Zustandsgrößen – für den jeweiligen Skalierungsbereich muss ein anderes Set an Relationen berücksichtigt werden. Relationsmengen lassen sich als Vektor schreiben.  $j$  ist der Laufindex der Relationsmenge, während  $i$  der Laufindex der Relationen innerhalb dieser Relationsmenge ist.

$$R_{m,j} = (R_{j,1} \dots R_{j,i}) \quad (6.23)$$

Relationen, die sich über verschiedene Skalierungsbereiche  $A$  und  $B$  unterscheiden, sind Element beider Relationsmengen:

$$\cap R_{uab} := \{\forall R_{n,i} \mid (R_{n,i} \in R_{m,A}) \wedge (R_{n,i} \in R_{m,B})\}. \quad (6.24)$$

---

## 6.5 Multiple-Domain-Matrix für die Baureihenentwicklung

---

Eine Möglichkeit, die für die Entwicklung von Baureihen unter Unsicherheit als relevant identifizierten Informationen über Anforderungen Prozesse, Ähnlichkeit und Gestalt für tiefergehende Analysen und darauf aufbauend die weitere Konkretisierung des Produkts aufzubereiten, sind *Multi-Domain-Matrizen* (MDM). Sie sind eine Assemblierung aus *Dependency-Structure-Matrizen* (DSM) und *Domain-Mapping-Matrizen* (DMM).<sup>327</sup>

Um das Modell hinter einer MDM für die Baureihenentwicklung herzuleiten, werden im Folgenden kurz Situation, Ziel und Ergebnis dargestellt.

### Situation

Die DSM bilden die Relationen zwischen Elementen derselben Domäne, beispielsweise Gestalteeigenschaften, ab; DMM bilden Relationen zwischen Elementen verschiedener Domänen ab, bspw. die Abhängigkeit einer Gestalteeigenschaft von einer Anforderung.<sup>328</sup>

Vorteil dieser matrixbasierten Ansätze ist die Möglichkeit, mit Hilfe von Algorithmen die großen anfallenden Datenmengen zu verarbeiten und die Informationen zur Beherrschung von Komplexität zu nutzen, indem beispielsweise in der Entwicklung von Baukästen Module aufgrund der Agglomeration stark interagierender Bauteile, ähnlicher Funktionen oder stark vernetzter Eigenschaften gebildet werden. Damit wird durch verringerte modulübergreifende Interaktionen die Komplexität reduziert. Ein Design wird oft dahingehend verändert, dass Abhängigkeiten, die Zirkelschlüsse nach sich ziehen, eliminiert werden, auch dies reduziert die Komplexität.<sup>329</sup>

Damit wird klar, dass ein zentraler Einsatzbereich von matrixbasierten Modellen die Analyse und Synthese von Produktarchitekturen ist. Klassische Domänen, innerhalb derer die Modellierung von Relationen stattfinden, sind:<sup>330</sup>

---

<sup>327</sup> Vgl. LINDEMANN ET AL. 2009, S. 50 ff.

<sup>328</sup> Ebenda.

<sup>329</sup> Vgl. STEWARD 1981, S. 72 f.

<sup>330</sup> Aus AHMAD ET AL. 2012, S. 224 f. und RICHTER ET AL. 2016, S. 1340.

- Anforderungen
- Funktionen
- Wirkprinzipien
- Funktionsträger
- Bauteile
- Module
- Parameter (Gestalteigenschaften)
- Dokumente

In Hinblick auf die Baureihenentwicklung unter Unsicherheit muss es hier einige Anpassungen geben. Funktionen sowie Agglomerate von Gestalteigenschaften (Bauteile, Module, Funktionsträger) sind für die Beurteilung der Kritikalität einer Skalierung nur von untergeordnetem Nutzen. Funktionen sind nicht ausreichend quantifiziert und nicht ausreichend relational konkretisiert, um Aussagen hinsichtlich einer Skalierung zu treffen. Agglomerate von Gestalteigenschaften „verschmieren“ die Relationen mit Bezug auf einzelne Gestalteigenschaften, die zur Synthese halbähnlicher Baureihen relevant sind.

Weiterhin fehlt die für die Analyse von Unsicherheit der Prozessbezug. An dieser Stelle lassen sich die Mapping-Ansätze von GERO & KANNENGIESSER anführen, die eine der Grundlagen der weiteren Modellierung bilden. Durch das Mapping zwischen gewollten (Funktionen) und tatsächlichen (Verhalten) Zusammenhängen zwischen Größen, sowie den Objekten, die das technische Objekt beschreiben (Struktur) lassen sich *Function-Behaviour-Structures* (FBS) modellieren.<sup>331</sup> Diese können ebenfalls in MDM abgebildet werden<sup>332</sup>, bleiben aber auf Basis von Objekten, nicht Prozessen.

Um auch auf Prozesse eingehen zu können, erweitern GERO & KANNENGIESSER die FBS auf Prozesse; hier wird die FBS auf den Zweck eines Prozesses, das Verhalten i.S. von tatsächlichen Prozesseigenschaften und die Struktur eines Prozesses (Input, Output, Transformation) übertragen.<sup>333</sup> Die Strukturklasse wird also in drei Kategorien aufgespalten. Kritisch zu sehen ist hier jedoch, dass Zweck des Prozesses und die Transformation überlappen, sowie dass die Transformation in nicht informationsverarbeitenden Prozessen von den Autoren nicht konkret dargestellt wird.

Grundsätzlich sind die zur Unsicherheitsbeherrschung im Sinne des Vorgestellten Unsicherheitsmodells relevanten Prozessgrößen nicht als Klassen von Strukturobjekten vorgesehen, vgl. Abschnitt 2.3 und Kapitel 3.

## Ziel

Aus der dargestellten Situation leitet sich folgendes Ziel ab:

*Die domänenübergreifende Analyse von Relationen (Mapping) ist für die Baureihenentwicklung nützlich, hierbei wird sich diese Arbeit jedoch unter dem Aspekt der Baureihe auf die skalierungsrelevanten Domänen fokussieren. Dabei müssen auch detailliertere Informationen über Prozesse berücksichtigt werden, als dies zurzeit in der Literatur der Fall ist, die Informationen sollen, wo sinnvoll, auch einen Bezug zur Skalierung haben. Kompatibilität zu den Ansätzen der Analyse und Synthese von Produktarchitekturen soll gewährleistet werden. Eine matrixbasierte Darstellung ist zielführend, um die großen Informationsmengen rechnergestützt erfassen, analysieren und modifizieren zu können.*

<sup>331</sup> Vgl. GERO und KANNENGIESSER 2007, S. 380.

<sup>332</sup> Vgl. HAMRAZ ET AL. 2015, S. 35.

<sup>333</sup> Vgl. GERO und KANNENGIESSER 2007, S. 386.

## Ergebnis: MDM-Struktur

Zunächst sind die Domänen einer baureihenfokussierten MDM (bMDM) festzulegen. Aus der Analyse der Baureihenentwicklung unter Unsicherheit und der für sie kritischen Entitäten, vgl. Abschnitte 4.1 und 4.3, Kapitel 3, lässt sich die Betrachtung von Anforderungen und Prozessen begründen.

Die klassische Baureihenentwicklung nach PAHL & BEITZ und alle weiteren auf der Nutzung physikalischer Ähnlichkeit fußenden Skalierungsmethoden, vgl. Abschnitt 2.2 und Unterabschnitt 2.2.5, beziehen sich auf physikalische Effekte und die Gestalt des zu skalierenden Objekts (Material- und Geometrieigenschaften). Ähnlichkeitskennzahlen bleiben hier meist allgemein was die Gestalt angeht und verlangen keine feingeometrische Beschreibung. Tritt Halbähnlichkeit auf, wird die detaillierte Beschreibung von Geometrie umso relevanter. Dies geschieht auch bei nicht ähnlich skalierender Unsicherheit in einzelnen Gestalteigenschaften, beispielsweise wenn die Varianz des E-Moduls nicht von der Größe abhängt, die Toleranzfeldbreiten aber schon, das jedoch unterproportional zum Wachstum des jeweiligen Nennmaßes.

Hinsichtlich des Ziels der nBRE, vollständige Produkte einschließlich skalierten Produktvarianten simultan zu entwickeln, können weitere Domänen hinzugefügt, bzw. die Elemente einzelner Domänen extensiver Beschrieben werden. Der Fokus wird im Weiteren jedoch auf die baureihenspezifischen Notwendigkeiten gelegt.

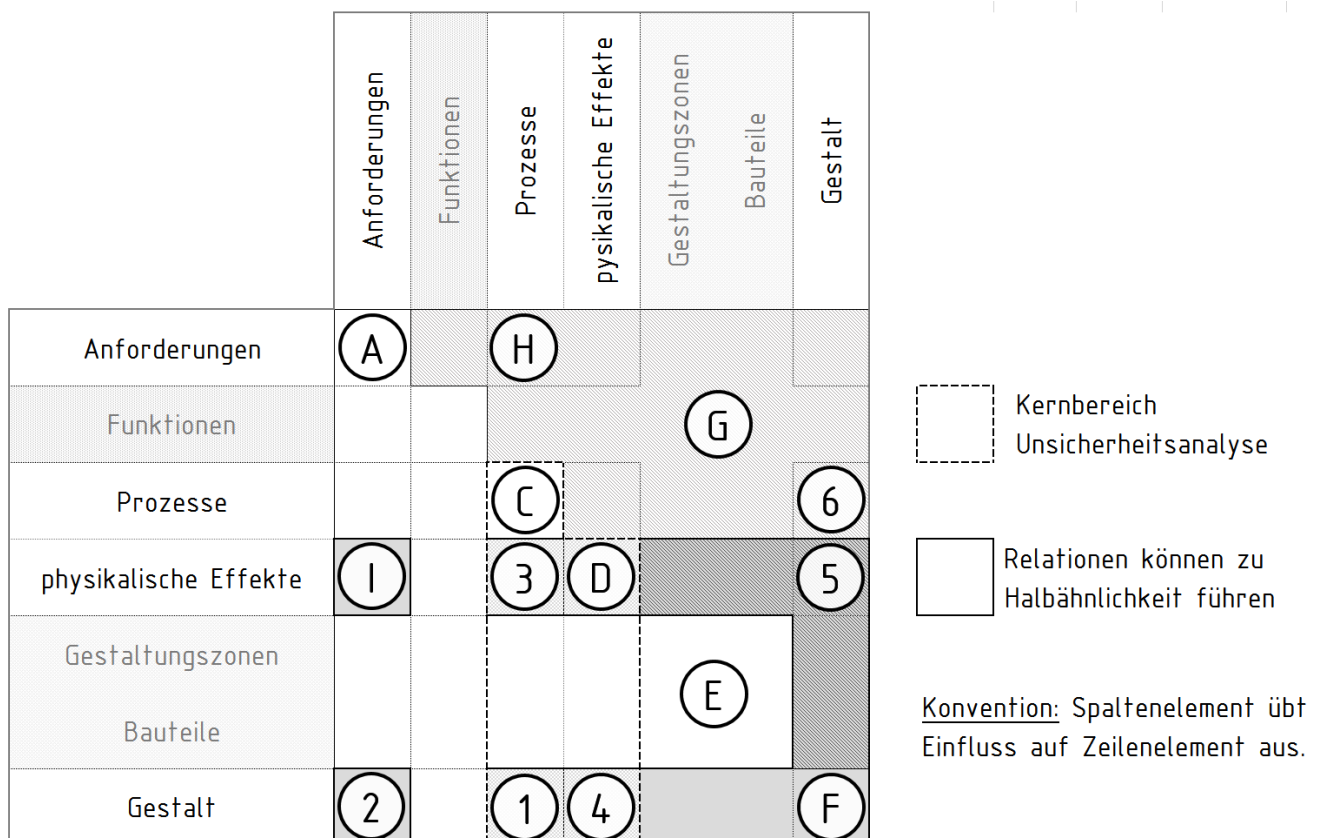


Abbildung 6.12: Multiple Domain Matrix für die Baureihenentwicklung. Herleitung der Submatrizen und Zelleninhalte siehe Text.

Konkret umfassen die Domänen, dargestellt in Abbildung 6.12, also die weiter unten beschriebenen Elemente. Wechselwirkungen von Domänen mit dem Element „Informationen“ aus dem



Prozessmodell werden vernachlässigt, da sie für die Baureihenentwicklung keine Rolle spielen, vgl. Abschnitt 6.3.

**ID: A      Relation: An-An      Elemente: Anforderungen**

**Erläuterung:**

Anforderungen (An) aller Art können in die bMDM integriert werden; für Baureihen relevant sind die den Skalierungsbereich bestimmenden Anforderungen, die sich oft aus mehreren einzelnen Anforderungen ergeben (a), sowie die Anforderungen, die Einfluss auf die Ähnlichkeit des Systems nehmen (b).

**Beispiel:**

(a) Anforderungen zu minimal und maximal übertragendem Moment der Getriebebaureihe, Abstufung der Baureihe.

(b) Eine Anforderung bezüglich des Bauraums steht in Wechselwirkung mit einer Anforderung hinsichtlich des übertragbaren Moments. Relevant für Baureihen, wenn  $Ho \neq \text{const.}$

**ID: 1      Relation: An-pE      Elemente: Anforderungen und physikalischen Effekten zugehörige abhängige Eigenschaften**

**Erläuterung:**

Anforderungen, die physikalische Effekte betreffen, können zu Restriktionen des Lösungsraums führen – diese können auch für nur einen Teil des Skalierungsbereichs relevant sein.

**Beispiel:**

Ein unter Skalierungsgesichtspunkten günstiger Effekt mit dem eine Nebenfunktion realisiert wird (gleiche Wachstumsexponenten hinsichtlich der Gestalteigenschaften) führt aufgrund mangelnder Akzeptanz zu einer Restriktion; beispielsweise ein Querpressverband zur Befestigung des Zahnrades auf der Welle, wenn kein ausreichend großer Ofen zur Erwärmung der Zahnräder großer Baureihenglieder verfügbar ist.

**ID: 2      Relation: An-Ge      Elemente: Anforderungen, Geometrie- und Werkstoffeigenschaften**

**Erläuterung:**

Alle die Gestalt festlegenden Anforderungen müssen in der BRE berücksichtigt werden. Sie verursachen meist Halbähnlichkeit durch die Beachtung übergeordneter Normen oder Anforderungen (a).<sup>334</sup> Ferner schränken manche Anforderungen mit Geometriebezug den Lösungsraum ein (b)

**Beispiel:**

(a) Die Verwendung von Innensechskantschrauben nach ISO 4762 ist vom Kunden vorgeschrieben; damit sind keine „M 6,5“-Schrauben zur Gehäusemontage möglich, auch wenn

dies aus der Skalierung nach *Ho* folgen würde - die übergeordnete Norm gibt die möglichen Stufensprünge der Gehäuseabmessungen vor, oder es kommt zu halbähnlichen Anpassungen.  
(b) Durch eine Bauraumvorgabe kann ein Getriebe nur mit einem um 90° gedrehten An- und Abtrieb eingebaut werden, es wird eine Kegelradstufe notwendig.

**ID: -      Relation: Fn-X      Elemente: Funktionen, Elemente anderer Domänen**

**Erläuterung:**

*Funktionen* sind für die Produktentwicklung und die Entwicklung von Baukästen<sup>335</sup> wichtig, können in der Baureihenentwicklung aufgrund der Funktionsidentität von Baureihengliedern unter Skalierungsgesichtspunkten ausgeklammert werden.

**ID: B      Relation: Pr-Pr      Elemente: Prozesselemente**

**Erläuterung:**

*Prozess-Prozess-Interaktionen* sowohl innerhalb eines Prozesses (Nebengrößen) sowie Varianz von Eigenschaften der Prozesselemente sind häufig abweichend vom Arbeitsmitteln skalierend (und im Falle von Neben- oder Störgrößen sogar häufig unabhängig vom Maßstab, beispielsweise Anregungsfrequenzen bei der Fahrt eines Fahrzeugs über Kopfsteinpflaster).

Diese anders oder nicht skalierenden Einflüsse sind potenzielle Gründe für Halbähnlichkeit im Produkt und müssen analysiert werden. Operatoreigenschaften in Fertigungs- und Recyclingprozessen im Lebenslauf des zu entwickelnden Produkts werden zweckmäßig auch in der Pr-Pr-DSM dargestellt, da sie i.d.R. nur einen (Teil-)Prozess betreffen (bspw. Werkzeugwechsel und/oder Maschinenwechsel in jedem Fertigungsschritt). Für Fertigungsprozesse können auch die Operatoreigenschaften als gesonderte Kategorie eingeführt werden, falls eine Verkettung von Unsicherheit aus Fertigungsprozessen einschließlich ihrer Unsicherheit modelliert werden soll. Dies entspricht der Intention der Prozesskettenmodellierung in der UMEA<sup>336</sup>, erlaubt jedoch durch die einfachere Form eine einfachere Implementierung in computergestützten Verarbeitungsverfahren.<sup>337</sup>

**Beispiel:**

Die im Drehprozess der Welle realisierbaren Fertigungstoleranzen haben Einfluss auf die Montagekräfte der Lager, da sie unterproportional Größenabhängig sind, muss auf die relative Toleranzfeldbreite bei kleinen entwürfen geachtet werden, um eine gute Montierbarkeit sicherzustellen.

<sup>334</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 828 f.

<sup>335</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 847.

<sup>333</sup> Vgl. ENGELHARDT 2013, S. 104.

<sup>337</sup> Beispiele für veränderliche Eigenschaften in diesem Kontext sind Merkmale, die erst mit dem folgenden Fertigungsschritt überhaupt erzeugt werden (Fräsen einer Passfedernut), oder deren zugeordneter Wert sich ändert (Durchmesser einer Welle beim Schleifen des Lagersitzes).

**ID: 3**      **Relation: Pr-An**      **Elemente: Anforderungen und Prozesselemente**

**Erläuterung:**

Normalerweise werden *Prozesse* basierend auf *Anforderungen* gewählt, um einen Zweck zu realisieren. Die Pr-An-Abhängigkeiten sind jedoch nützlich, um die Ergebnisse einer Prozessanalyse zur Anforderungsermittlung<sup>338</sup> zu dokumentieren und formalisieren.

**Beispiel:**

Im Zuge der Baureihenentwicklung ist eine Anforderungsermittlung aus einer Prozessanalyse sinnvoll, um beispielsweise einen von  $\varphi_L^2$  abhängigen Wärmeeintrag in das Getriebegehäuse durch die Störgröße der Sonneneinstrahlung zu berücksichtigen, der zusammen mit der mit  $\varphi_L^3$  wachsenden Operatoreigenschaft der Wärmekapazität des Gehäuses in Abhängigkeit zur Anforderung „max. Betriebstemperatur“ steht.

**ID: 4**      **Relation: Pr-pE**      **Elemente: Stör- und Nebengrößen, Ressourcen, Nutzereinflüsse, welche Zustandsgrößen der Effekte beeinflussen**

**Erläuterung:**

Physikalische Effekte realisieren ein Verfahren, durch welches der jeweilige Prozess konkretisiert wird.<sup>339</sup> Über diese Kopplung von physikalischem Effekt und Prozess wird die Unsicherheitsbetrachtung in der Baureihenentwicklung erst möglich: Ähnlichkeit bezieht sich auf die physikalischen Effekte und erlaubt die effiziente Skalierung von Systemen, während Unsicherheit in Prozessen auftritt.

*Die Interaktion beider Domänen bildet die Grundlage der Skalierung von Unsicherheit, vgl. Abschnitt 3.4!*

**Beispiel:**

Angenommen das Beispielgetriebe aus Abbildung 3.1 treibt ein Förderband an: Eine periodische Fluktuation im zu transportierenden Massenstrom führt zu einer Drehschwingung am Abrieb des Getriebes; über den physikalischen Effekt des Formschlusses wird diese Schwingung auch auf das Antriebsmoment übertragen. Solche Relationen können für die Baureihenentwicklung relevant sein, wenn sie größenabhängig sind, oder nur für einige Baureihenglieder auftreten.

**ID: 5**      **Relation: Pr-Ge**      **Elemente: Stör- und Nebengrößen, Ressourcen, Nutzereinflüsse, und Operandeneigenschaften welche Gestalteigenschaften des Produkts als Operator (Nutzungsprozesse) beeinflussen**

<sup>338</sup> Vgl. BIRKHOFFER 2017, S. 33 ff.

<sup>339</sup> Vgl. GRAMLICH 2013, S. 87.

**Erläuterung:**

Das zu entwickelnde Produkt übernimmt in Nutzungsprozessen die Rolle des Operators, dementsprechend sind die Operatoreigenschaften bereits vollständig über die Gestalteigenschaften definiert<sup>340</sup> und in der Domäne der Gestalt enthalten. Wirkungen zwischen Gestalteigenschaften des Operators und des Prozesses sind in Nutzungsprozessen werden in der Pr-Ge-DMM abgebildet.

**Beispiel:**

Beispielhaft für den Einfluss von Störgrößen auf Gestalteigenschaften des Operators ist beim Getriebe die asymmetrische Wärmedehnung des Gehäuses durch einseitige Sonneneinstrahlung, welche aufgrund  $F_o \neq \text{const.}$  auftritt. Sie ist jedoch aufgrund der indirekten Abhängigkeit des Prozesses von der Gestalt über die DMM 4 und 6 abzubilden. Damit ergibt sich nur noch eine Abhängigkeit von Operanden- und Operatoreigenschaften, wenn bspw. im Falle einer Werkzeugmaschine als zu entwickelndem Produkt die Werkstückaufnahme ausreichend groß zur Aufnahme des Operanden gestaltet sein muss. Auch Alterung und Verschleiß sind hier oft maßstabsabhängig, wirken jedoch über den physikalischen Effekt.<sup>341</sup>

**ID: C****Relation: pE-pE****Elemente: Physikalischen Effekten zugehörige abhängige Eigenschaften****Erläuterung:**

*physikalische Effekte* (pE): Diese Domäne beinhaltet ausschließlich abhängige Eigenschaften. Dies sind klassischerweise solche Eigenschaften, die sich zur Wirkgröße oder zu vom Produkt als Operator ausgehenden Neben- und Störgrößen assemblieren (dies sind oft Zustandsgrößen).

**Beispiel:**

Die Verlustleistung des Getriebes hängt u.A. von der Temperatur des Öls (Viskosität) ab, während die Viskosität des Öls Einfluss auf die Verlustleistung und damit die Temperatur des Öls hat. Diese Effekte sind wie in Abbildung 5.1 gezeigt maßstabsabhängig. Die Verlustleistung ist abgeleitet aus den Eigenschaften des Systems, welches durch den Effekt elastohydrodynamischer Schmierung beschrieben wird.

**ID: 6****Relation: pE-Ge****Elemente: Abhängigkeiten von Material und Geometrie von einem physikalischen Effekt****Erläuterung:**

Die von einem *physikalischen Effekt* beeinflussten *Gestalteigenschaften* werden in der pE-Ge-DMM abgebildet. Sie können je nach Effekt maßstabsabhängig sein.

**Beispiel:**

<sup>337</sup> Vgl. GRAMLICH 2013, S. 79.

<sup>341</sup> Vgl. LOTZ und KLOBERDANZ 2014, S. 18 ff.

Die Verlustwärme im Getriebe hat einen Einfluss auf die Länge der Welle zwischen den Lagern, und damit unter Umständen ( $\Delta T_{\text{Welle}} \neq \Delta T_{\text{Gehäuse}}$  oder  $\alpha_{T,\text{Welle}} \neq \alpha_{T,\text{Gehäuse}}$ ) auf die Verformung der Tellerfedern, vgl. Abbildung 3.1. Hier ergeben sich infolge Rückwirkungen auf die Lagerkräfte und die Verlustleistung, alle Zusammenhänge sind wieder maßstabsabhängig.

Ein anderes Beispiel ist die relative Steighöhe eines Mediums in einer Kapillare – auch sie ist stark vom Maßstab der Kapillare (bei geometrischer Ähnlichkeit zu  $\varphi_L^4$ ) und den Stoffeigenschaften des Mediums abhängig.

**ID: D**      **Relation: Gz-Gz**      **Elemente: Bauteile, Gestaltungszonen**  
**Bt-Bt**  
**Gz-Bt**

**Erläuterung:**

*Gestaltungszonen* (Gz) und *Bauteile* (Bt): Die Dekomposition des Produkts in Gestaltungszonen und (ggf. funktionsintegrierten) Bauteile ist primär für die Baukastenentwicklung, die Entwicklung einer geometrisch zu skalierenden Hauptausführung und eventuelle Fertigungs- und Montageprozesse relevant und daher in der nBRE als mögliche Erweiterung vorgesehen. Sie wird jedoch nicht weiter vertieft. Informationen diesbezüglich finden sich in den DSM und DMM in Bereich D, auch Abhängigkeiten von den Funktionen sind für diese Thematik relevant.

**Beispiel:**

Für das Getriebe ist als Fragestellung beispielsweise interessant, ob ein Ölkühler als separates Modul oder integriert ausgeführt wird (kann vom Umfang des Skalierungsbereichs abhängen, Beispiel: Notwendigkeit eines Ölkühlers für großmaßstäbliche Ausführungen, für kleine Ausführungen kommen mit passiver Kühlung aus, vgl. Abbildung 5.1).

**ID: 7**      **Relation: diverse**      **Elemente: alle**

**Erläuterung:**

Inversen der besprochenen Relationen, relevant für Analyse der abhängigen Ist-Eigenschaften, vgl. CPM-Ansatz, Abschnitt 5.4.

**ID: E**      **Relation: Ge-Ge**      **Elemente: Geometrie- und Materialeigenschaften**

**Erläuterung:**

*Gestalt* (Ge): Die Gestalt des Produkts ist aus Baureihensicht insbesondere für die Synthese und Repräsentation der Wachstumsgesetze im Falle von Halbähnlichkeit relevant (Ge-Ge-Abhängigkeiten als Repräsentation der Relationen in Wachstumsgesetzen). Bei vollständiger Ähnlichkeit ist diese Domäne aus Baureihensicht nur für die Entwicklung der Hauptausführung relevant. Im Regelfall ist diese Domäne diejenige, in der ein großer Teil der Methoden des Robust Design angewandt wird.

**Beispiel:**

Aus Sicht der Baureihenentwicklung sind insbesondere maßstabsabhängige Varianz (Toleranzfeldbreite), Kompatibilitätsbedingungen für nicht ähnlich skalierende Schnittstellen zwischen Modulen (Motor-Getriebe-Schnittstelle) und insbesondere die Abbildung von Wachstumsgesetzen für einzelne Produkteigenschaften relevant.

**ID: 8****Relation: Ge-Pr****Elemente: Geometrie- und Materialeigenschaften, Prozesselemente****Erläuterung:**

Gestalteigenschaften können nur mittelbar über den physikalischen Effekt und das Verfahren auf den Prozess wirken (sie bestimmen die Wirkgröße).<sup>342</sup> Einflüsse von Operandeneigenschaften auf Gestalteigenschaften sind gerichtet (DMM 5), ihre Inverse wird hier ebenfalls nicht aufgetragen. Dieser Eintrag bleibt leer.

**ID: 9****Relation: Ge-pE****Elemente: Geometrie- und Materialeigenschaften, abhängige Eigenschaften/Zustandsgrößen physikalischer Effekte****Erläuterung:**

In diesem Bereich findet die Analyse der Ist-Eigenschaften eines Systems statt, also auch die Kontrolle nach einem Syntheseschritt. Dies muss in der Baureihenentwicklung für alle Entwürfe durchgeführt werden. „Welcher Wert wird der abhängigen Eigenschaft mit der Festlegung der unabhängigen Gestalteigenschaften zugewiesen?“

**Beispiel:**

Beispiel ist die Überprüfung, ob in Abhängigkeit von maßstabsabhängiger Varianz der Gestalteigenschaften und eventuell maßstabsabhängiger Effekte (Anisotropie der Festigkeit sehr kleiner Entwürfe) der Querpressverband eines Zahnrades auf der Welle noch funktionsfähig ist, oder welches Drehmoment und welche Drehzahl sich am Abtrieb bei der Wahl bestimmter Werte für die Radien der Zahnräder  $r_1$  und  $r_2$  (für die Baureihe zu gruppieren zur dimensionslosen Kennzahl des Übersetzungsverhältnisses  $i$ ) ergeben.

Aus Sicht der Skalierung ist noch zu ergänzen: Die Elemente der Domäne pE entsprechen weitgehend den Größen und Eigenschaften, die in der Relevanzliste des zu betrachtenden Problems zusammengefasst sind, vgl. Dimensionsanalyse, Unterabschnitt 2.2.3, wodurch ein direkter Transfer der Informationen von dimensionsanalytischen Skalierungsmodellen und bMDM ermöglicht wird.

*Die dimensionslosen Kennzahlen werden durch die pE-pE-Abhängigkeiten repräsentiert.*

In Bezug auf die Unsicherheit ist sicherzustellen, dass hier die sog. Modelleffekte<sup>343</sup> (also ein großer Teil der Skalierungsmodellunsicherheit) abgebildet werden, um die Skalierungsmodellunsicherheit gering zu halten.

<sup>342</sup> Vgl. GRAMLICH 2013, S. 87.

<sup>343</sup> Vgl. SPURK 1992, S. 63 f.

In der Gestalt-DSM und den aus der Gestalt abgeleiteten DMM kann auch die Varianz von Gestalteigenschaften abgebildet werden um varianzbedingt skalierungskritische Einflüsse zu identifizieren. Dies ist insbesondere in den DMM 5 (Alterung und Verschleiß durch Rückwirkungen eines Prozesses auf die Gestalt), 6 (beispielsweise Wärmedehnung oder Stofftransport), 8 (Varianz der Gestalt des Operators führt zu Varianz in der Wirkgröße bzw. stellt eine Varianz von Operandeneigenschaften dar; weitere Interaktionen als auf Wirkgröße oder Operand sind nicht möglich!) und 9 (Änderung der Gestalt führt zu abweichenden physikalischen Effekten, bspw. Umschlag von laminarer Strömung in turbulente Strömung) der Fall.

Der Bereich 7 in Abbildung 6.12 beinhaltet die Inversen der besprochenen Abhängigkeiten; dieser Bereich ist zur Analyse des Systemverhaltens relevant, während die besprochenen Abhängigkeiten immer vom Abstrakten zum Konkreten gerichtet sind und eine Synthese unterstützen.

### Ergebnis: MDM-Inhalte

Die in die bMDM zu integrierenden Inhalte variieren stark in Abhängigkeit der verfügbaren Informationen. Damit unterliegt der Inhalt der bMDM einer starken Abhängigkeit von der Produktkonkretisierung, also dem Fortschreiten des Produktentwicklungsprozesses. Weiterhin hängt die Art der in der bMDM aufzubereitenden Daten vom Zweck der Modellierung als bMDM ab. Verschiedene mögliche, pragmatisch zu wählende Abbildungen in den einzelnen Zellen der bMDM sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Informations-konkretisierung	ID	Bezeichnung	Beispiel
<b>qualitativ</b>	<b>a</b>	Binäre Relation	Markierung einer Relation, bspw. als X
	<b>b</b>	Abgestufte Bewertung der Relation	-2 – ungewollte starke Relation -1 – ungewollte schwache Relation 0 – keine Relation 1 – schwache gewollte Relation 2 – starke gewollte Relation
<b>quantitativ</b>	<b>c</b>	Deterministische Relation (Skalierungsmodelle)	Wachstumsexponenten: siehe Abbildung 5.1.
	<b>d</b>	ungewiss-unsichere Relation	Szenario-Wachstumsgesetze in Zellen abhängiger Eigenschaften, Min-Max-Werte (Stufensprünge und dimensionsbehaftet für eine Ausführung) in Zellen unabhängiger Eigenschaften
	<b>e</b>	stochastisch-unsichere Relation	deterministische zzgl. stochastische Wachstumsgesetze, WDF für unabhängige Eigenschaften und Messwerte; Wachstumsgesetze für statistische Parameter falls vorhanden

Tabelle 6.1: Mögliche Datentypen der Inhalte der bMDM.



---

Sollen in frühen Phasen der Entwicklung qualitative Aussagen generiert werden, reicht es aus, anzugeben, ob zwischen zwei Elementen der jeweiligen Submatrix eine Relation besteht oder nicht. Dies ist sozusagen der Standardfall der relationalen Beschreibung.<sup>344</sup> Auch eine Aussage, ob die Relation gewünscht oder unerwünscht ist, und wie stark sie ist, kann getroffen werden; hier kann zudem noch nach der Art der Interaktion (z.B. stofflich, informatorisch, geometrisch, und energetisch) unterschieden werden.<sup>345</sup> Dies führt zu mehreren Werten pro Matrixzelle – im von PIMMLER & EPPINGER als Werkzeug zur Entwicklung modularer Produkte entwickelten Schema vier Einträge.<sup>346</sup>

Die Darstellung quantitativer Zusammenhänge erfolgt insbesondere über die Nutzung der Unsicherheits- und Szenariowachstumsgesetze und Ähnlichkeitskennzahlen, vgl. S. 103). Im Rahmen einer Baureihenentwicklung sind insbesondere Unterschiede in den Wachstumsexponenten unterschiedlicher Elemente relevant. Daher beinhalten bei Annahme deterministischer Modelle die Wachstumsexponenten zusammen mit den den Gestaltmerkmalen zugeordneten Werten sowie einer Angabe ihres Gültigkeitsbereichs alle Informationen zu Bestimmung von Skalierungsgrenzen, vgl. Abschnitt 7.3.2.

Zusammen mit dem  $\Pi$ -Theorem von BUCKINGHAM können alle Relationen, die von Gestalteigenschaften oder Zustandsgrößen ausgehen, durch Wachstumsexponenten beschrieben werden. Dies betrifft alle Relationen zwischen Elementen der Domänen der Gestalt, des physikalischen Effekts und der Prozesse, mithin alle skalierungsrelevanten Domänen. Die Modellierung anhand von Wachstumsgesetzen ist erst bei Kenntnis aller für den Effekt maßgeblichen Gestaltparameter möglich. Die Implementierung von Wachstumsgesetzen in der bMDM ist also erst ab dem physikalische Effekte umfassenden Konkretisierungslevel der Produktmodelle möglich, da die effektrelevanten Gestalteigenschaften die ersten vom Entwickler aktiv festgelegten Gestalteigenschaften sind.

---

<sup>344</sup> Vgl. LINDEMANN ET AL. 2009, S. 70 ff.

<sup>345</sup> Vgl. PIMMLER und EPPINGER 1994, S. 4.

<sup>346</sup> Ebenda.

---

## 7 Methoden und Vorgehensmodelle für Teilprobleme der Baureihenentwicklung

---

Die in dieser Arbeit enthaltene methodische Unterstützung gliedert sich in vier Bereiche: Das in Kapitel 5 beschriebene übergeordnete Vorgehen in der Baureihenentwicklung mit dem PEP der nBRE, die zur Modellierung von Baureihen verwendbaren Modelle in Kapitel 6, sowie die in diesem Kapitel erarbeiteten Vorgehensmodelle für spezielle Probleme der Baureihenentwicklung und der BRE zugeordnete Methoden.

Diese Inhalte gliedern sich in ein allgemeines Vorgehen zum Problemlösen in der BRE, ein allgemeines vorgehen zur Beherrschung von Skalierungsunsicherheit und Skalierungsmodellunsicherheit, Methoden zur Analyse von maßstabsabhängigem Verhalten und Hinweise zur Synthese skalierungsrobuster Lösungen.

---

### 7.1 Problemlöseprozesse in der Baureihenentwicklung

---

Die Entwicklung einer Baureihe nach der nBRE zielt, wie in Abschnitt 5.3 hergeleitet und insbesondere in Abbildung 5.3 verdeutlicht, darauf ab, die Skalierbarkeit eines Systems bereits bei der Synthese von Lösungen, also auch in frühen Phasen des PEP zu berücksichtigen. In diesen Phasen des Entwicklungsprozesses hat der Entwickler vor allem Probleme zu lösen.<sup>347</sup>

Für das Problemlösen haben sich aufgrund des auf der Handlungsebene nicht grundsätzlich bekannten Lösungsweges Heuristiken herausgebildet, die auf Basis denkpsychologischer Ansätze helfen, die grundsätzlichen Denkprozesse des Entwicklers zu strukturieren. Durch ihre strukturgebende Intention sind sie den diskursiven Problemlösestrategien zuzuordnen, die durch zerlegen und schrittweises Lösen von Teilproblemen die Komplexität zu senken versuchen und dadurch einen gegenüber dem intuitiven Problemlösen planbareren und weniger von der Kreativität des Entwicklers abhängigen Problemlöseprozess bereitstellen.<sup>348</sup> Das Senken der Komplexität ist wegen der Vielfalt der maßstabsabhängigen Relationen wichtig, vgl. Abschnitte 6.4 und 6.5.

Eine Unterstützung beim Problemlösen ist also in der nBRE im Gegensatz zur kBRE oder zur oBRE sinnvoll. Letztere setzen hinsichtlich der Skalierbarkeit auf reine Bearbeitung von Aufgaben, im Falle der oBRE-Ansätze, vgl. Abschnitt 2.2.5, sogar auf Algorithmen. Für kBRE und oBRE reicht dies aufgrund der nach der Konzeptphase stattfindenden Skalierung aus. Die nBRE stellt jedoch höhere Anforderungen an den mit dem Skalierungsproblem konfrontierten Entwickler – im Gegensatz zur klassischen Skalierungsaufgabe, die sich im Falle eines nicht gut skalierbaren Konzepts erst zum Problem entwickelt, vgl. Abschnitt 4.1. Verschiedene Heuristiken, welche zur Problemlösung entwickelt wurden, beispielsweise klassische *Test-Operate-Test-Exit*-Vorgehen (TOTE)<sup>349</sup>, *Plan-Do-Check-Act* nach DEMING<sup>350</sup> oder der *Vorgehenszyklus zur Systemsynthese*<sup>351</sup> sind im sehr flexibel einsetzbaren *Münchener Vorgehensmodell* (MVM) zusammengefasst.<sup>352</sup> Das Münchener Vorgehensmodell stellt dem Entwickler einen Standardweg zum Problemlösen zur Verfügung, welcher de facto identisch mit anderen Vorgehensmodellen ist, insbesondere dem Problemlöseverfahren nach ANDREASEN und HEIN.<sup>353</sup> Es werden jedoch zusätzlich Möglichkeiten zur Iteration und Abwandlung des Vorgehens eingeführt, indem zwischen allen Teilschritten des Problemlöseprozesses

---

<sup>347</sup> Probleme grenzen sich von Aufgaben dadurch ab, dass der Weg zur Zielerreichung nicht oder nicht vollständig bekannt ist, ebenso ist die Existenz einer Lösung noch nicht gesichert. Vgl. PAHL ET AL. 2007, S. 60.

<sup>348</sup> Vgl. PAHL ET AL. 2007, S. 61 ff.

<sup>349</sup> Vgl. MILLER ET AL. 1960, S. 26.

<sup>350</sup> Vgl. DEMING 1982, S. 88.

<sup>351</sup> Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM 2013, S. 92.

<sup>352</sup> Vgl. LINDEMANN 2009, S. 46 ff.

<sup>353</sup> Vgl. ANDREASEN und HEIN 1987, S. 24.

begehbare Verbindungen eingeführt werden. Ein an das Münchner Vorgehensmodell strukturell angelehntes und für die Baureihenentwicklung angepasstes Vorgehensmodell ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

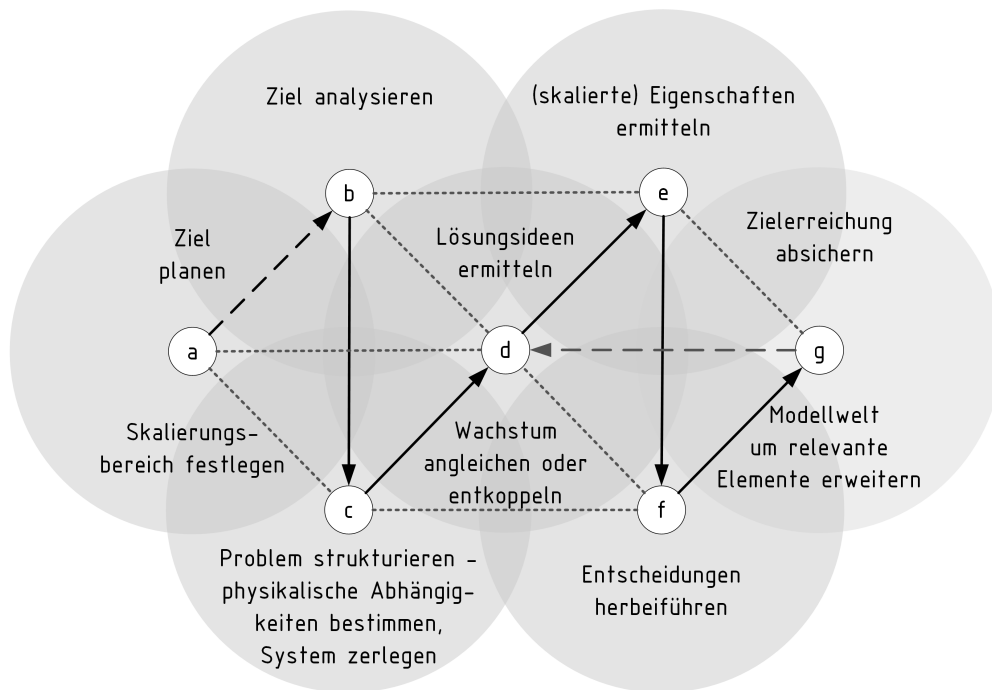


Abbildung 7.1: Münchner Vorgehensmodell, angepasst für die Baureihenentwicklung.

Hinsichtlich der Nutzung in der nBRE wurde das Vorgehensmodell wie folgt angepasst: Die Reihenfolge des siebenschrittigen Standardweges durch das Modell (schwarze Pfeile) ist, aufgrund der universellen Übertragbarkeit auf Problemlöseprozesse, unverändert. Die Formulierung der Einzelschritte ist jedoch auf die nBRE bzw. Systemskalierung angepasst. Zunächst ist als Ziel der Skalierung (a) der Skalierungsbereich der Baureihe, oder, bei nur einer abgeleiteten skalierten Variante, der Stufensprung der Zielgröße festzulegen. Eine Zielanalyse (b) ist in der nBRE optional (gestrichelter Eingangspfeil), sie ist insbesondere sinnvoll, wenn übergeordnete Anforderungen die Skalierbarkeit einschränken bzw. großen Einfluss auf den Skalierungsprozess nehmen, z.B. wenn Schnittstellen zu nicht oder abweichend skalierten Nachbarsystemen vorliegen. Das Strukturieren des Problems (c) ist im Baureihenkontext vor allem eine Analyse der physikalischen Effekte und ihrer Abhängigkeit untereinander, dies kann z.B. durch die bMDM realisiert werden, vgl. hierzu Abschnitt 6.5.

Das Ermitteln der Lösung (d) bezieht sich bei komplexen Skalierungsaufgaben (verschiedene physikalische Effekte, skalierte Module) vor allem darauf, das Wachstumsverhalten der Produkteigenschaften, die in verschiedene Effekte eingehen, anzugleichen. Dies ist der Fall, wenn sich aus den Ähnlichkeitskennzahlen abweichende Wachstumsexponenten für die jeweiligen Eigenschaften ergeben. Alternativ können verschiedene physikalische Effekte auch durch voneinander unabhängige Produktelemente realisiert werden, hiermit wird, entsprechend des Unabhängigkeits-Axioms von SUH, vgl. S. 11, ein entkoppeltes und damit bereichsweise unabhängig zu skalierendes Produkt realisiert. Beides wird eingehender in Abschnitt 7.4 behandelt.

Aus den ermittelten Lösungsideen und den damit verknüpften Soll-Eigenschaften können, entsprechend der Analyse-Synthese-Zyklen, vgl. Abschnitt 5.4, durch Ableitung der Unsicherheit beschreibenden Wachstumsgesetze für Gestalteigenschaften aus den allgemeinen Wachstumsgeset-

---

zen aus Schritt (d) die Ist-Eigenschaften berechnet werden. Nach dem Vergleich der Ist- mit den Soll-eigenschaften wird eine Entscheidung herbeigeführt (f) ob die in (d) ermittelte Lösung ausreichend ist, oder modifiziert/verworfen werden muss. Ist eine Anpassung der Lösungen notwendig, kann dies auf dem Weg f-d-e-f geschehen.

Das Absichern der Zielerreichung (g) kann im Rahmen der Baureihenentwicklung als Schritt zur Erweiterung der SiM aufgefasst werden. Ein Reflektieren der möglichen Risiken für die Umsetzung der gefundenen Lösung, wie im MVM vorgesehen, umfasst im Rahmen der Skalierung insbesondere die Reflektion der Grenzen der der Skalierung zugrunde gelegten Produktmodelle sowie die Frage, ob bisher unberücksichtigte aber relevante Effekte auftreten. In diesem Fall ist die Skalierung integrierende Modellwelt zu erweitern. Die Auswirkungen einer Anpassung der Modelle sind beispielsweise über eine Iteration auf dem Weg g-e-f zu evaluieren. Fällt die Entscheidung (f) negativ aus, ist wieder die Iteration f-d-e-f zum Generieren neuer Lösungen durchzuführen.

---

## 7.2 UMEA - Uncertainty Mode and Effects Analysis in der Baureihenentwicklung

---

Die *Uncertainty Mode and Effects Analysis* (UMEA) von ENGELHARDT beinhaltet ein fünfschrittiges Vorgehen zur Analyse und Bewertung von Unsicherheit.<sup>354</sup> Sie kann, auf die Modellbildung im Skalierungsprozess übertragen, zur Identifikation eines zu geringen Informationsstandes beitragen. Dadurch wird der Entwickler dazu veranlasst, durch zielgerichtete Verbesserung der Modelle die Skalierungsunsicherheit zu senken. Modelleffekte und maßstabsabhängige Varianz können mit Hilfe der UMEA identifiziert und beherrscht werden.<sup>355</sup> Letzteres geschieht zum einen durch die höhere Qualität der auf einer breiteren Informationsgrundlage getroffenen Entwicklungsentscheidungen – verbesserte Analyseprozesse führen zu zielgerichteteren Syntheseprozessen, vgl. Abschnitt 5.4 – gleichzeitig wird durch die Bewertung von Unsicherheit sichergestellt, dass mit Unsicherheit behaftete, aber irrelevante Probleme nicht im Übermaß Entwicklungsressourcen binden.

Im Rahmen der Baureihenentwicklung wird insbesondere das Vorgehen der UMEA adaptiert. Darüber hinaus sind der UMEA diverse Modelle und Methoden, insbesondere aus dem Risikomanagement, zugeordnet.<sup>356</sup> Ihr Einsatz ist auch in der Baureihenentwicklung sinnvoll, wobei die Fragestellungen hinsichtlich der Skalierungsrisiken anzupassen sind. Skalierungsrisiken sind insbesondere die Auswirkungen von Skalierungsmodellunsicherheit und divergierender Wachstumsexponenten, vgl. Abschnitt 3.3 und Unterabschnitt 7.3.2. Die qualitative Ausrichtung vieler der UMEA zugeordneten Methoden ermöglicht es im Rahmen der nBRE vor allem, potenziell kritische Effekte und Eigenschaften zu identifizieren. Eine abschließende Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen dieser Unsicherheit auf das skalierte Produkt ist i.a.R. erst nach der Genese quantitativer Modelle (Ähnlichkeitskennzahlen, Wachstumsgesetze), und damit ab dem Prozess des Konzipierens, möglich.

---

### 7.2.1 BRE-UMEA zur Beherrschung von Skalierungsunsicherheit in Produkt und Prozess

---

Die auf Modelleffekte und Varianz fokussierte *Baureihenentwicklungs-UMEA* (BRE-UMEA) greift auf die Informationen zurück, die in der SiM, vgl. Abschnitt 6.2, hinterlegt sind, und die mit den Analysemethoden aus diesem Kapitel gewonnen wurden. Informationen aus den Analyseprozessen an Produkt und Prozess werden in die UMEA-Bearbeitung „importiert“, Entscheidungen und

---

<sup>354</sup> Vgl. ENGELHARDT 2013, S. 55.

<sup>355</sup> Vgl. ENGELHARDT 2013, S. 138 ff.

<sup>356</sup> Methodenbeschreibungen in ENGELHARDT 2013, S. 142 ff., Zuordnung zu den Vorgehensschritten der UMEA S. 55 ff.

Wissen über das Verhalten werden in den Syntheseprozess „exportiert“. Diese beiden parallelen Vorgehensstränge werden am Beispiel einer PEP-Phase in Abbildung 7.2 dargestellt. Im Folgenden wird das Vorgehen detailliert beschrieben.

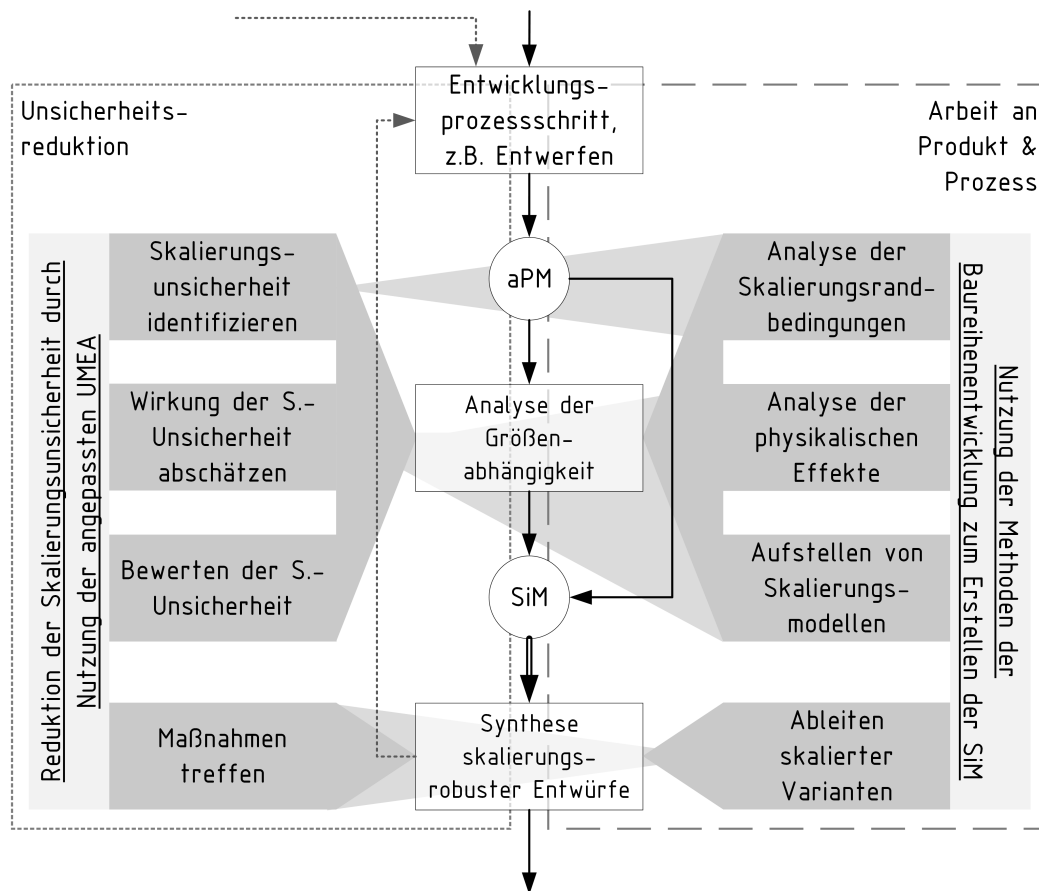


Abbildung 7.2: Parallele Nutzung der Methoden der Baureihenentwicklung und der UMEA im Analyse-Synthese-Zyklus der Produktentwicklung. Zu beachten sind auch die durch flächige Pfeile im Hintergrund dargestellten Informationsflüsse, Informationen aus Produkt und Prozess helfen, die Skalierungsunsicherheit zu reduzieren.

## 7.2.2 SMU-UMEA zur Beherrschung von Skalierungsmodellunsicherheit in der Entwicklung

Die fünf Schritte der UMEA<sup>357</sup> werden nun auf die BRE-UMEA erweitert. In Hinblick auf die Beherrschung von Skalierungsunsicherheit aus Modelleffekten und maßstabsabhängiger Varianz sind dies:

1. Die *Analyse der Skalierungsrandbedingungen*: Zusammenstellen der Informationen über den benötigten Skalierungsbereich, übergeordnete skalierungsrelevante Anforderungen und Interaktionen mit Nachbarsystemen. Die Informationen können direkt aus der SiM bzw. der bMDM als Bestandteil der SiM entnommen werden.
2. Die *Identifikation von Skalierungsunsicherheit*: Analyse der Teil-Skalierungsmodelle hinsichtlich divergierender Wachstumsexponenten, vgl. Abschnitt 7.4.1. Analyse der physikalischen

<sup>357</sup> Umfeld-/Zielanalyse, Identifikation von Unsicherheit, Wirkung von Unsicherheit, Bewerten von Unsicherheit und Entscheiden, vgl. ENGELHARDT 2013, S. 55.

---

Effekte hinsichtlich Unstetigkeiten bei der Skalierung<sup>358</sup> und Abgleich der Annahmen, welche hinter den Effekt- und Skalierungsmodellen stehen mit den real vorliegenden skalierten Systemen („Kann das Eigengewicht vernachlässigt werden?“, „Schlägt die Strömung von laminar zu turbulent um?“).

3. *Die Wirkung der Skalierungsunsicherheit abschätzen:* Auf Basis von Punkt 2 muss nun für alle Effekte abgeschätzt werden, wie groß Differenz der skalierten Ist-Eigenschaften zu den Soll-Eigenschaften ist, sowie für welche Skalierungsrichtung(en) die Relation kritisch wird. Dies geschieht über einfache Skalierungsmodelle (Ähnlichkeitskennzahlen) oder bereits vorliegende Wachstumsgesetze.
4. *Das Bewerten der Skalierungsunsicherheit:* Ist die Differenz zwischen skalierten Soll- und Ist-Eigenschaften außerhalb des Qualitätsziels, wird der Effekt als skalierungskritisch eingestuft und erfordert weitere Beachtung.
5. *Das Treffen von Maßnahmen:* Skalierungskritische Effekte müssen durch das Anpassen der Lösung in unkritische Effekte überführt werden. Dies kann im Fall divergierenden Wachstumsverhaltens durch einen Wechsel des physikalischen Effekts oder eine halbähnliche Anpassung der Gestaltungszone geschehen. Wird die Varianz einer Eigenschaft unzulässig groß, kann ein weniger skalierungssensitives Wirkprinzip oder eine halbähnlich angepasste Gestalt gewählt werden, vgl. Unterabschnitt 7.4.1.

Hinsichtlich der Skalierungsmodellunsicherheit – zur Unterscheidung vom Vorgehen zur Beherrschung der Modelleffekte und Varianz wird die folgende Handlungsempfehlung SMU-UMEA genannt – bleibt das Vorgehen gleich, die Tätigkeiten des Entwicklers ändern sich jedoch. Die Schnittstellen zwischen der BRE-UMEA und der SMU-UMEA sind in Abbildung 7.2 dargestellt.

In der SMU-UMEA findet im Gegensatz zur BRE-UMEA kein Informationsimport aus den Analyseprozessen statt. Die Modelle welche zur Analyse verwendet werden sollen selbst verbessert werden. Dasselbe gilt für den Informationsexport; die gewonnenen Informationen werden nur zur Verbesserung der Skalierungsmodelle genutzt, was deren Unsicherheit mit möglichst geringem Arbeitsaufwand reduziert.

1. *Analyse der Skalierungsrandbedingungen:* Identisch zur BRE-UMEA.
2. *Identifikation von Skalierungsmodellunsicherheit:* Analyse der Skalierungsmodelle hinsichtlich nicht abgebildeter Effekte und Einflüsse. Hierzu können die Informationen aus Prozessmodellen, und Relevanzlisten für Effekte genutzt werden, vgl. Abschnitte 6.3 und 2.1.4 sowie Unterabschnitt 2.2.
3. *Wirkung der Skalierungsmodellunsicherheit abschätzen:* Auf Basis von Punkt 2 muss nun für alle Effekte abgeschätzt werden, inwieweit nicht abgebildete Effekte die Validität<sup>359</sup> des Modells beeinflussen. Wird das Modell als nicht mehr valide betrachtet, weil durch Wechselwirkungen der Effekte andere Phänomene relevant sind, als die abgebildeten, kann direkt zu Schritt 5 übergegangen werden.

---

<sup>358</sup> Dazu kann der Katalog potenziell skalierungskritischer Effekte in Anhang D genutzt werden.

<sup>359</sup> Weiterführende Informationen zur Validierung und Verifikation von Berechnungsmodellen sind AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME) - PTC 60 / V&V 10 2006, S. 9, zu entnehmen.



4. *Bewerten der Skalierungsmodellunsicherheit*: Ist das Modell valide, gilt es, das Modell zu verifizieren: Liefert es trotz Vernachlässigung von Effekten oder Varianz in Eigenschaften hinreichend genaue Ergebnisse?<sup>360</sup>
5. *Maßnahmen treffen*: Fällt die Antwort auf die Fragen nach der Validität und der Verifikation des Skalierungsmodells negativ aus, muss die Informationsbasis erweitert und das Modell angepasst werden. Danach beginnt der Zyklus erneut. Leitfragen für diesen Schritt sind „Wie kann der relevante Effekt modelliert werden? Welche Modellparameter müssen für verifizierte Ergebnisse gewählt werden? Wie kann dieses Submodell in das Skalierungsmodell integriert werden?“.

Daraus leitet sich ein Vorgehensmodell zur Beherrschung von Skalierungsmodellunsicherheit ab, siehe Abbildung 7.3. Es ordnet Validierung und Verifikation der Modelle in den Prozess der Produktmodellkonkretisierung ein.

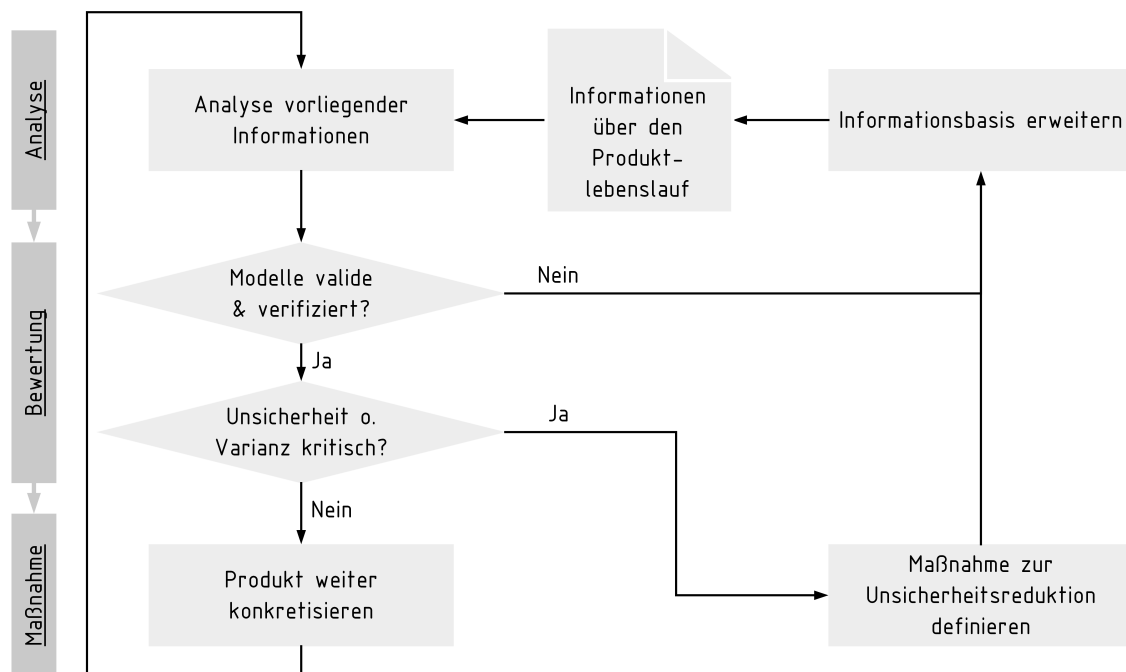


Abbildung 7.3: Vorgehensmodell zur integralen Anwendung der UMEA auf Skalierungsmodellunsicherheit.

### 7.3 Analyse maßstabsabhängigen Verhaltens technischer Systeme

Die Analyse größenabhängigen Produktverhaltens wird auf Basis verschiedener Methoden durchgeführt und stellt die Basis für eine spätere Synthese von Teil- oder prinzipiellen Gesamtlösungen dar. Das größenabhängige Systemverhalten wird auf der Ebene der physikalischen Effekte und Effektklassen durch Ähnlichkeitsbeziehungen sowie auf den Ebenen des Wirkprinzips, der Wirkstrukturen und der Gestalt durch produktspezifische Wachstumsgesetze beschrieben.

<sup>360</sup> Bei der mathematischen Strukturoptimierung wird bspw. ein bekannt genaueres Modell (z.B. mit modellierter Nichtlinearität) mit einem einfacheren Modell (z.B. linearisiert) verglichen, liefert das einfachere Modell ausreichend genaue Ergebnisse, wird dieses aufgrund der verringerten Rechenzeiten zur Optimierung der Struktur benutzt.



---

Wichtig für die Analyse ist die Betrachtung der Lebenslaufprozesse; der Umgang mit dem für die nBRE erweiterten Modell technischer Prozesse ist in Unterabschnitt 6.3.2 beschrieben. Die verschiedenen Lebenslaufprozesse liefern die Informationen für die auf das Produkt einwirkenden Stör- und Nebengrößen sowie die Abhängigkeit der Produkteigenschaften von Varianz in Prozessgrößen. Ein Beispiel hierfür sind Fertigungsprozesse, durch die eine Varianz im Arbeitsmittel (bspw. einer Werkzeugmaschine) zu Varianz im Operanden (dem zu entwickelnden und auf der Werkzeugmaschine zu fertigenden Produkt) führt. Eine solche Varianz wirkt sich dann in den Nutzungsprozessen aus: Der Endzustand eines Nutzungsprozesses variiert mit den durch Varianz, Stör- und Nebengrößen bedingten Schwankungen in Wirkgröße und Prozess.

Die Beschreibung dieser Zusammenhänge kann über die in Abschnitt 6.4 eingeführten Unsicherheitswachstumsgesetze und Ähnlichkeitskennzahlen für Unsicherheit erfolgen. Im Unterabschnitt 7.3.1 wird die Nutzung dieser Modelle im Kontext der Unsicherheitsanalyse beschreiben. Unterabschnitt 7.3.2 beinhaltet das Vorgehen zur Identifikation skalierungskritischer Eigenschaften.

---

### 7.3.1 Methoden zur Analyse größenabhängiger Varianz

---

Zur Analyse auf verschiedenen Konkretisierungsebenen ab Wirkprinzipiebene lassen sich Monte-Carlo-Analysen, DoE und Sensitivitätsanalysen zur Beschreibung größenabhängigen Verhaltens verwenden. Sie basieren auf den in Abschnitt 6.4 eingeführten Unsicherheitswachstumsgesetzen und Unsicherheit abbildenden dimensionslosen Kennzahlen. Die Nutzung einer Monte-Carlo-Analyse in der nBRE kann hilfreich sein, um die maßstabsabhängigkeit von statistischen Modellparametern wie Schiefe, Mittelwert und Kurtosis einer Verteilung zu bestimmen.

Zur Modellierung werden die in Abschnitt 6.4 besprochenen Szenariowachstumsgesetze ebenso wie Wachstumsgesetze für stochastische Parameter und dynamisierte Wachstumsgesetze verwendet. Details hierzu sind, ebenso wie das detaillierte Vorgehen bei der Modellierung solcher Wachstumsgesetze, der Literatur zu entnehmen.<sup>361</sup>

Das allgemeine Vorgehen bei der Verwendung von Wachstumsgesetzen zur Darstellung und Analyse maßstabsabhängiger Varianz ist in Abbildung 7.4 gezeigt. Beispiel der Analyse ist ein Knickstab unter der Einwirkung eines korrosiven Mediums, welches eine zeitlich veränderliche Störgröße darstellt. In Abhängigkeit des Ziels der Analyse und der verfügbaren Information über die auftretende Unsicherheit kann zwischen statischer Unsicherheit in den Ausprägungen der Ungewissheit oder der stochastischen Unsicherheit oder dynamischer Unsicherheit derselben beiden Ausprägungen unterschieden werden.

Aus statischen Wachstumsgesetzen können unter Berücksichtigung von Informationen über ungewisse Eigenschaften oder Zustandsgrößen eines technischen Systems Szenario-Wachstumsgesetze, vgl. S. 106, abgeleitet werden. Steigt mit dem Fortschreiten des PEP die Qualität der Information, können mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation probabilistische Wachstumsgesetze für die Zielgrößen einer Skalierung abgeleitet werden. Diese probabilistischen Wachstumsgesetze erlauben z.B. Aussagen über die Schwankung der Produkteigenschaften über die Baureihe hinweg.

Beide Klassen von Wachstumsgesetzen können dynamisiert werden, wenn zeitabhängige Unsicherheit, beispielsweise der Angriff eines korrosiven Mediums, aber auch periodische Temperaturschwankungen vorliegen, vgl. S. 84.

---

<sup>361</sup> Vgl. LOTZ ET AL. 2014 und LOTZ und KLOBERDANZ 2014.

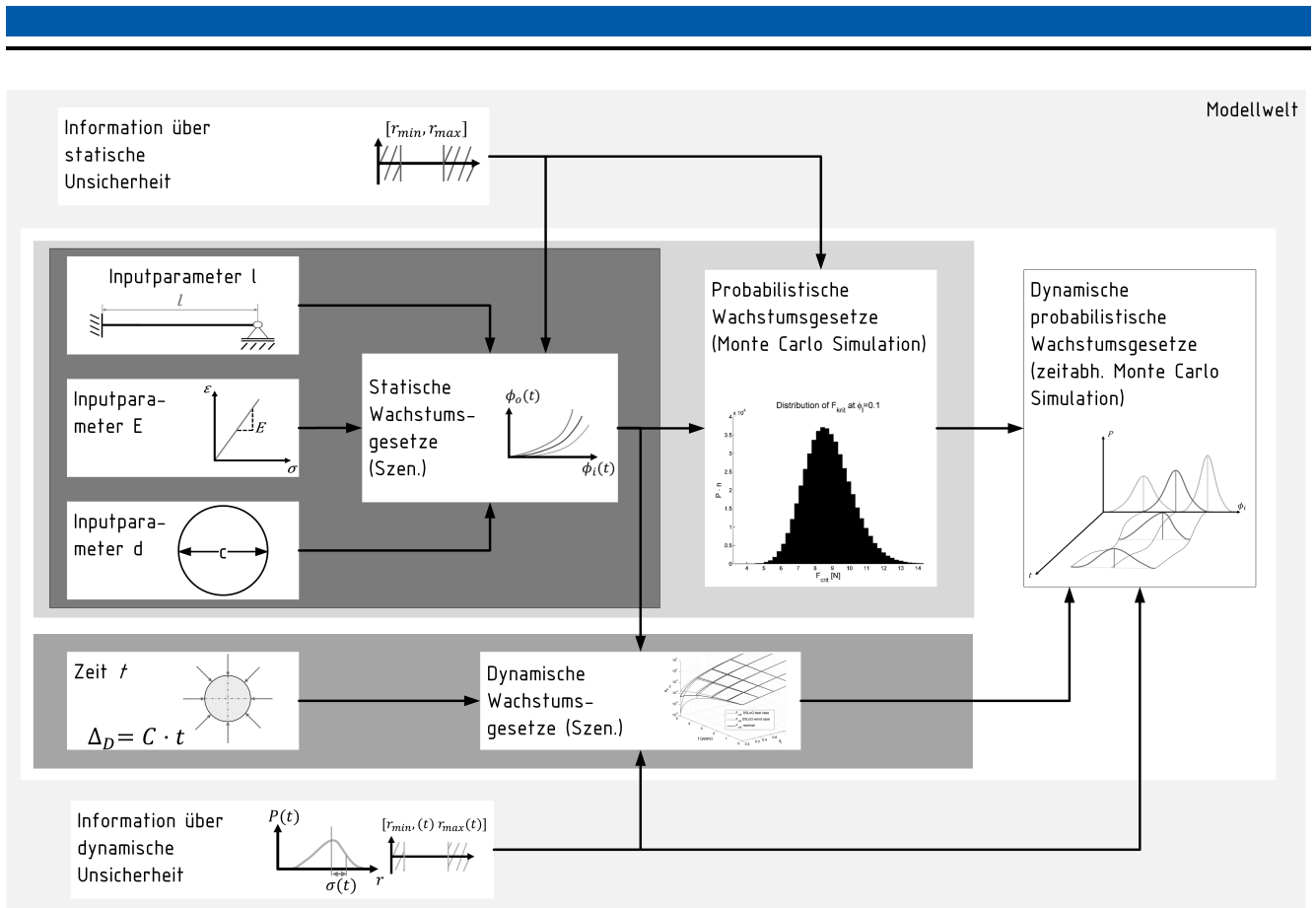


Abbildung 7.4: In Abhängigkeit der Informationsart können verschiedene Szenariowachstumsgesetze oder stochastische Wachstumsgesetze aufgestellt werden. Diese können bei Bedarf zeitabhängig formuliert werden.

### 7.3.2 Identifikation skalierungskritischer Eigenschaften und von Skalierungsgrenzen

Die Identifikation *skalierungskritischer Eigenschaften* bildet den Abschluss der Analyse maßstabsabhängigen Verhaltens und die *Grundlage der Synthese gut skalierbarer Lösungen*, vgl. Abschnitt 7.4.

Mit der Identifikation einer Eigenschaft als skalierungskritisch wird dem Entwickler eine zentrale Information zur Lösung eines Skalierungsproblems bewusst.

Eine Eigenschaft eines technischen Systems kann aus drei voneinander unabhängigen Gründen skalierungskritisch sein:

1. Die Eigenschaft ist über im Skalierungsbereich des Systems wechselnde Relationen mit der Skalierungszielgröße verbunden, wodurch die Skalierungsmodelle in Teilbereichen der Skalierung ungültig werden.
2. Die Eigenschaft ist über Relationen mit Anforderungen, Randbedingungen oder Skalierungszielgrößen dergestalt verknüpft, dass keinesfalls alle Ziele erreicht werden können.
3. Die Maßstabsabhängigkeit ihrer Varianz weist eine Charakteristik auf, die ein Erreichen der Qualitätsziele hinsichtlich der Skalierungszielgröße erschwert oder unmöglich macht.

*Kritikalität hinsichtlich der Skalierung liegt erst dann vor, wenn die Auswirkung eines oder mehrerer dieser Punkte die Skalierung des Produkts unter Beibehaltung der gewünschten Qualitätsstufe*

---

*und des Umfangs des Skalierungsbereichs den Skalierungsprozess stark erschwert oder unmöglich macht.*

Beispiele hierfür sind bereits aufgezeigt worden: Grund 1 ist beispielsweise bei der Betrachtung von Strömungswiderständen in laminarer oder turbulenter Strömung sichtbar und wird detaillierter am Beispiel eines Gleitlagers in Unterabschnitt 8.1.6 behandelt. Grund 2 wurde bereits in den Abschnitten 3.1 und 5.1 angesprochen, klassisches Beispiel ist das Vorliegen mechanischer und thermischer Anforderungen. Mechanische und thermische Ähnlichkeit sind nicht gleichzeitig realisierbar, ohne Stoffeigenschaften in großem Maße anzupassen. Auch der Widerspruch zwischen technologischen Anforderungen und einer Skalierung fällt hierunter, beispielsweise Mindestwanddicken beim Guss, die in dynamischen Systemen zu überproportional hohen Trägheitskräften führen. Grund 3 entspricht dem unterproportionalen Wachstum der Toleranzfeldbreiten von Welle und Nabenbohrung im Querpressverband, vgl. Abbildung 3.3.

Skalierungskritische Eigenschaften sind – die o.g. Beispiele werden teils seit Beginn der Nutzung der Modellwissenschaft zu Entwicklung von Baureihen verwendet – klassische Gründe für das Scheitern einer Skalierung oder umfangreiche korrigierende Eingriffe in die Folgeentwürfe, vgl. Abschnitt 4.1. Grund hierfür ist das Erreichen von Skalierungsgrenzen: Infolge der genannten Effekte wird das System funktionsuntüchtig oder die Qualitätsziele werden verfehlt. Aus diesem Grund soll es dem Entwickler ermöglicht werden, skalierungskritische Eigenschaften systematisch zu erfassen und aus ihnen Skalierungsgrenzen abzuleiten.

### Erkennen wechselnder Relationen

Verändern sich Relationen innerhalb des Skalierungsbereichs wird im Falle des Zusammenwirkens mehrerer physikalischer Effekte, eine geometrisch ähnliche Skalierung unmöglich, wenn nur ein Teil der Effekte durch solche Wechsel der Relationen betroffen ist. Wird die Veränderlichkeit der Relationen nicht berücksichtigt, können die skalierten Ist-Eigenschaften massiv von den skalierten Soll-Eigenschaften abweichen, da die Skalierung mit einem nicht zutreffenden Modell erfolgt. Beispiele für solche Effekten sind in Anhang D aufbereitet. Die Analyse kann über einen Abgleich der Annahmen hinter den Produktmodellen, auf denen das Skalierungsmodell aufgebaut wird, mit den Randbedingungen der Skalierung erfolgen.

Wird beispielsweise die Vordeformation eines Knickstabs vernachlässigt, kann er näherungsweise mit der EULER-Gleichung beschrieben werden. Wird die relative Vordeformation beim Verkleinern des Stabes größer, vgl. (3.11), kann diese Annahme nicht mehr getroffen werden. Eine Auslegung nach Theorie zweiter Ordnung ist notwendig.<sup>362</sup> Andererseits wird für große Entwürfe der Einfluss des Eigengewichts relevant, da dieses je nach Lage des Stabes im Raum für eine zusätzliche Axialdruckbelastung oder eine vergrößerte Vordeformation sorgt. Der Entwickler muss also die Grenzen der allgemeinen Produktmodelle, auf denen die Skalierungsmodelle aufbauen, kennen. Nur so können valide Skalierungsmodelle erstellt werden.

Zur Beherrschung dieser Art von Skalierungsunsicherheit kann der Entwickler entweder, sofern vorhanden, auf dem ganzen Skalierungsbereich auf genauere Modelle zurückgreifen. Am Beispiel des Knickstabs bedeutet dies: grundsätzlich nach Theorie zweiter Ordnung rechnen, Eigengewichtseinfluss immer modellieren. Alternativ kann der Skalierungsbereich geteilt werden, vgl. Abbildung 5.7. Dies kann bereichsweise den Einsatz einfacherer Modelle erlauben, wodurch im Falle einer anschließenden Optimierung die Rechenzeit vermindert werden kann.

---

<sup>362</sup> Vgl. WIEDEMANN 2007, S. 128.

In Abbildung 7.5 sind verschiedene Klassen an Relationen zwischen Eingangs- und Zielgröße aufgetragen. Bei Erreichen einer Skalierungsmodelleinsatzgrenze ändert sich die Steigung der Relation in dieser Art Diagramm.

Zur Analyse, ob ein Effekt potenziell eines angepassten Modells bedarf, wenn er über ein gewisses Maß hinaus skaliert wird, bietet sich die Verwendung der Liste potenziell skalierungskritischer Effekte in Anhang D als Checkliste ohne Anspruch auf Vollständigkeit an.

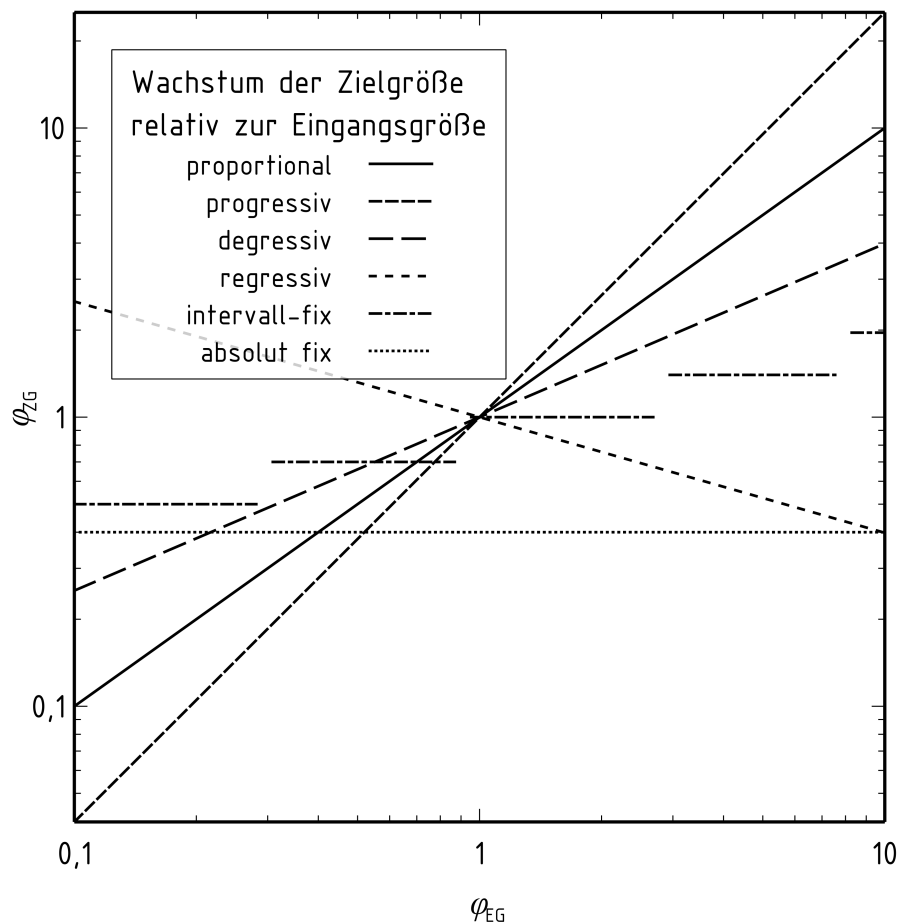


Abbildung 7.5: Relationskategorien für Wachstum beschreibende Relationen: Verschiedene Relationen zwischen einer Eingangs- und einer Zielgröße einer Skalierung. Die doppelt logarithmische Darstellung erlaubt einen direkten Vergleich der Exponenten der Eingangsgrößen im Wachstumsgesetz.

### Erkennen nicht vereinbarer Ziele der Skalierung

Hier kann die Überprüfung durch das Ableiten von Wachstumsgesetzen aus den Ähnlichkeitskennzahlen der auftretenden physikalischen Effekte erfolgen.<sup>363</sup> Folgen aus zwei Ähnlichkeitskennzahlen für dieselbe Eigenschaft unterschiedliche Wachstumsgesetze, also unterschiedliche Relationen, dann ist die betreffende Eigenschaft potenziell skalierungskritisch. In Abbildung 7.5 kann dies durch einen Wechsel der Relationskategorie oder durch eine veränderte Steigung der Funktion im doppelt logarithmischen Diagramm abgebildet werden. Dies ist eine notwendige Bedingung für Skalierungskritikalität.

<sup>363</sup> Vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 830 f.

---

Der Entwickler muss nun prüfen, ob eine halbähnliche Baureihe die Anforderungen an die Zielgrößen der Skalierung im Rahmen der benötigten Qualität und unter Berücksichtigung übergeordneter Anforderungen erfüllen kann. Zu diesem Zweck sind die betroffenen Gestaltungszonen so weit zu konkretisieren, dass gesicherte Informationen über die Ist-Eigenschaften des Systems vorliegen.

Müssen nur kleine Teile des Systems konkretisiert werden, empfiehlt es sich, diese Überprüfung auch in der Konzeptphase durchzuführen. Hier können verschiedene Kombinationen physikalischer Effekte zur Realisierung des Verfahrens bzw. der in Frage kommenden Verfahren gebildet und hinsichtlich der Skalierbarkeit überprüft werden. Dadurch kann der Entwickler die Kombination prinzipieller Teillösungen wählen, deren physikalische Effekte mit dem geringsten Maß an skalierungsbedingten korrektiven Anpassungen die Soll-Eigenschaften erreichen. Strategien zur Anpassung von prinzipiellen Gesamtlösungen an eine verbesserte Skalierbarkeit werden in Abschnitt 7.4 behandelt.

#### Erkennen unzulässig skalierender Varianz

Das Erkennen unzulässig skalierender Varianz ist auf die späteren Phasen der Produktentwicklung begrenzt. In frühen Phasen liegen in aller Regel keine ausreichenden Informationen vor, um Varianz quantifizieren können. In frühen Phasen kann lediglich die Sensitivität der Skalierungszielgrößen auf Schwankungen von anderen Eigenschaften berechnet werden. Ein auf die Quantifizierung von Auswirkungen von Unsicherheit fokussiertes Modell stellt EIFLER vor.<sup>364</sup>

Eine hohe Sensitivität weist auf potenziell kritische Eigenschaften hin. Ob die Eigenschaft tatsächlich kritisch wird, hängt vom Betrag der Varianz ab, ob die Eigenschaft skalierungskritisch wird, davon, ob die Varianz mit einem von der unsicheren Eigenschaft abweichenden Wachstumsexponent aufweist, vgl. Abbildung 7.5.

Quantifizierte Aussagen zur Skalierungskritikalität aufgrund von maßstabsabhängiger Varianz können durch die in Abschnitt 6.4 angesprochenen Unsicherheitswachstumsgesetze und das zugehörige Vorgehen getroffen werden, vgl. Unterabschnitt 7.3.1.

---

### 7.4 Synthese skalierungsrobuster Lösungen

---

Zentraler Punkt in der Entwicklung von Baureihen ist die Synthese von Lösungen, die sich auch entsprechend der Anforderungen skalieren lassen, und das möglichst ohne viele Anpassungen im Anschluss an die Skalierung notwendig zu machen. Hierzu werden in den folgenden Unterabschnitten Vorgehensweisen und Methoden entwickelt und vorgestellt, die Anwendung ist in Kapitel 8.1 beschrieben.

---

#### 7.4.1 Synthesestrategien bei unvollständiger Ähnlichkeit

---

Die Synthese von nicht vollständig ähnlich skalierbaren Systemen kann durch verschiedene Ansätze unterstützt werden. Diese Ansätze lassen sich voneinander nach der Art der Beeinflussung des technischen Systems durch die Synthese kategorisieren; dies geschieht auf Basis einer aus dem Robust Design (RD) bekannten Unterscheidung von Prinzipien zur Synthese robuster Systeme.<sup>365</sup>

Diese drei auf dem Verhalten von Systemen infolge von Unsicherheit basierenden Prinzipien sind hinsichtlich des Ziels bereits auf die Baureihenentwicklung übertragen<sup>366</sup>, jedoch noch nicht in den Kontext eines Baureihenentwicklungsprozesses eingeordnet. Die drei Prinzipien sind direkt auf die

---

<sup>364</sup> Vgl. EIFLER 2015, S. 130 ff.

<sup>365</sup> Vgl. MATHIAS 2016, S. 104.

<sup>366</sup> Vgl. LOTZ ET AL. 2015, S. 6305 ff.

Skalierungsunsicherheit übertragbar und in Abbildung 7.6 dargestellt. Ziel ist es, die Unsicherheit zu eliminieren, den Einfluss der Unsicherheit zu unterdrücken (auch eine Reduktion ist möglich) oder die Auswirkung der Unsicherheit zu reduzieren.

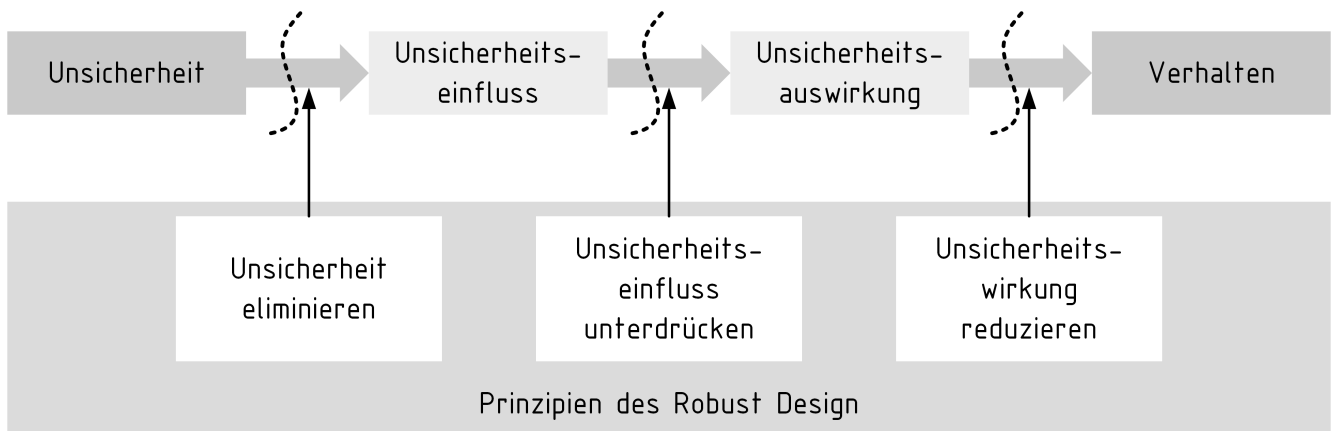


Abbildung 7.6: Prinzipien des Robust Design zur Beherrschung von Unsicherheit. In Anlehnung an MATHIAS 2016, S. 104.

Auf die Baureihe und die Skalierungsunsicherheit übertragen kann die Nutzung der Robust-Design-Prinzipien am Beispiel einer Abkantbank verdeutlicht werden. Der Abkantprozess ist in Abbildung 7.7 dargestellt; eine manuell betätigte Abkantbank ermöglicht die Blechumformung durch eine vom Nutzer bereitgestellte Kraft.

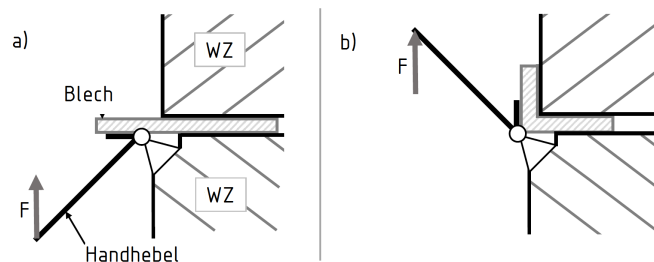


Abbildung 7.7: Abkantvorgang: Blech wird durch einen manuell betätigten Hebelmechanismus und ein Werkzeug (WZ) umgeformt.

Die Kraft des Nutzers ist dabei zum einen in sich unsicher – unterschiedliche Nutzer können unterschiedliche Kräfte aufbringen – zum anderen stellt der Menscheneinfluss, sofern er nicht berücksichtigt wird, eine Skalierungsunsicherheit dar; er limitiert den Skalierungsbereich der möglichen umformbaren Blechdicke je nach gewählter Lösung durch seine endliche Kraft. Damit ist die vom Nutzer eingebrachte Kraft sowohl mit Unsicherheit behaftet, als auch skalierungskritisch im Sinne von Abschnitt 7.3.2. Ferner bringt der Nutzer Unsicherheit durch mögliche Fehlbedingung und im Rahmen der Interaktion mit der Abkantbank als Operator des Abkantprozesses ein. Eine zur Unsicherheitsanalyse sinnvolle Darstellung ist die Visualisierung im erweiterten Prozessmodell, vgl. Abschnitt 6.3.

Prinzip 1, das Eliminieren der Unsicherheit, kann im Beispiel durch den Ausschluss der Nutzerinteraktion vom Abkantprozess erreicht werden. Wenn es keinen Maschinenbediener gibt, kann dieser keine Unsicherheit in das System einbringen, der Prozess verhält sich robust gegenüber menschenbedingter Varianz und skalierungsrobust gegenüber ergonomischen Einflüssen. Die Interaktion dieser Konzeptvariante mit dem Prozess ist in Abbildung 7.8 a) dargestellt.

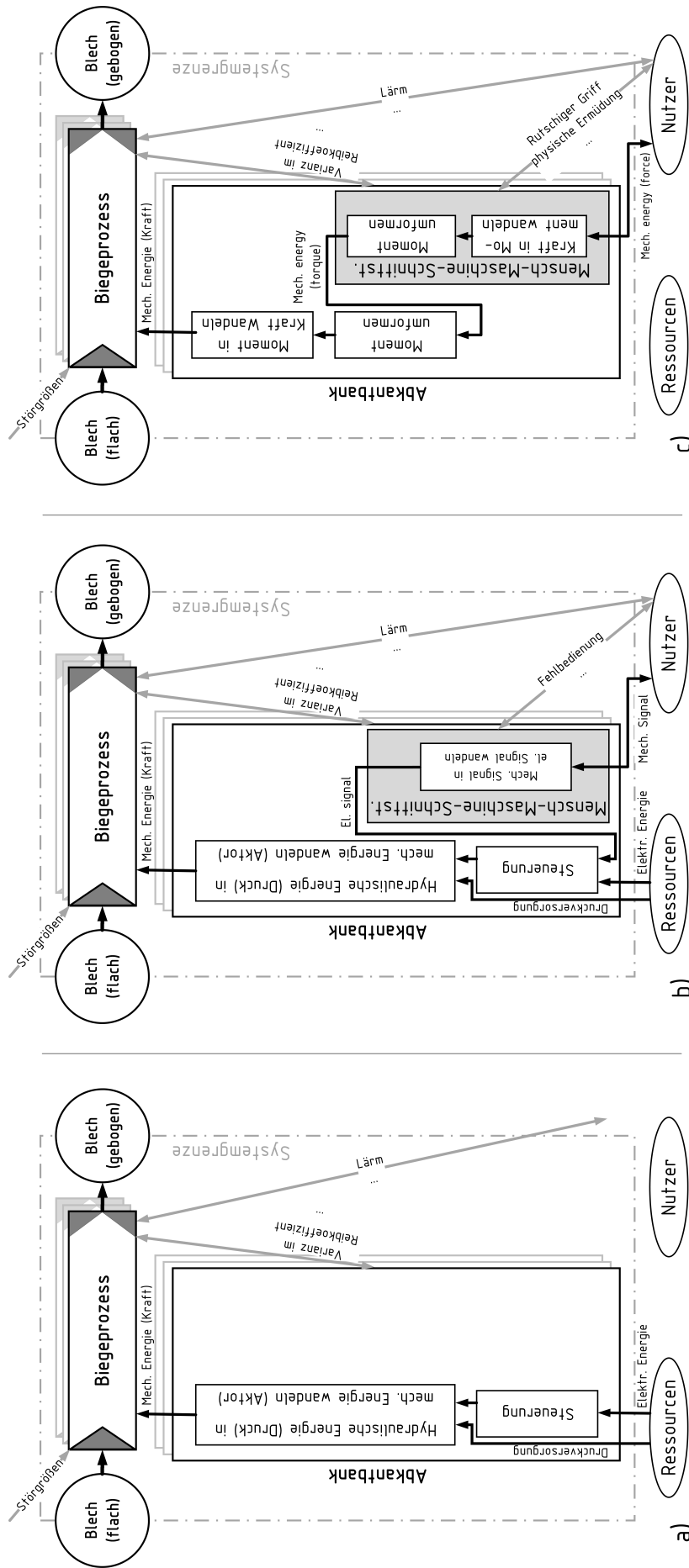


Abbildung 7.8: Verschiedene Konzeptvarianten der Abkantbank und ihre Interaktion mit dem Abkantprozess: a) Eliminierter Skalierungsunsicherheitseinfluss (bezogen auf Nutzereinflüsse) durch einen automatisierten Prozess. b) Unterdrückter Einfluss der Skalierungsunsicherheit auf den Prozess durch eine hydraulische Aktorik, die die Umformkraft bereitstellt. c) Reduzierte Skalierungsunsicherheitsauswirkung durch ein über die Baureihe hinweg angepasstes Getriebe.



Prinzip 2, das Unterdrücken des Unsicherheitseinflusses, kann durch ein Trennen von Maschinenbetätigung im Sinne eines kognitiven Vorgangs und der physischen Energiebereitstellung erreicht werden. Die für den Umformprozess benötigte Energie wird von einem Aktor bereitgestellt, der Nutzer gibt nur noch ein Signal. Schwankungen in der physischen Leistungsfähigkeit sind genauso wie die Grenze menschlicher Kraft weiterhin vorhanden, sie wirken jedoch nicht auf den Prozess ein. Dies ist in Abbildung 7.8 b) dargestellt.

Prinzip 3, das Verringern der Auswirkung der Unsicherheit, kann durch die maßstabsabhängige Variation der Übersetzung des Hebeltriebs erreicht werden. Eine Variante ist das Einfügen eines Zahnradgetriebemoduls, welches die Schnittstelle zwischen der skalierten Maschine (Ordnungskriterium ist die maximale umformbare Blechdicke, welche die Betätigungskraft definiert) und der nicht zu skalierenden Mensch-Maschine-Schnittstelle, dem Hebel, bildet.<sup>367</sup> Das Getriebe muss abweichend von Maschine und Mensch-Maschine-Schnittstelle skaliert werden, dies ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Die Interaktion dieser Lösung mit dem Abkantprozess wird in Abbildung 7.8 c) gezeigt. In allen Fällen nimmt die Robustheit gegenüber Schwankungen der physischen Fähigkeiten des Nutzers gegenüber der manuellen Abkantbank zu.

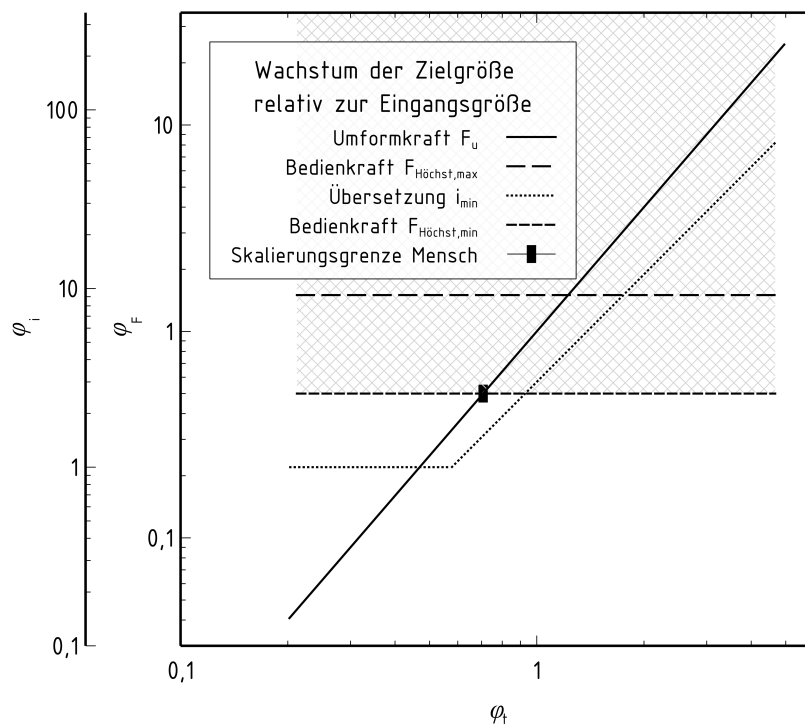


Abbildung 7.9: Wachstums-gesetze für die Abkantbank in einer Ausführung nach dem 3. Robust-Design-Prinzip. Dargestellt ist die benötigte Umformkraft, die hypothetische vom Nutzer aufzubriggende Kraft einschließlich ihrer Variationsbreite und das benötigte Übersetzungsverhältnis zur Kompensation des Nutzereinflusses in Abhängigkeit des Maßstabs.

Konkret bedeutet dies für die Baureihenentwicklung, dass der Entwickler drei Möglichkeiten hat, um inkompatible Relationen in einem zu skalierenden System, vgl. Unterabschnitt 7.3.2, so anzupassen, dass er trotzdem eine skalierungsrobuste Baureihe entwickeln kann:

<sup>367</sup> Voraussetzung ist, dass der Hebel einen hinreichend großen Bewegungsradius erlaubt, den der Nutzer auch ausführen kann.

1. Die Interaktion der zwei Effekte kann durch Ausschluss eines der Effekte oder die Nutzung eines kompatiblen Effekts verhindert werden, dann haben unterschiedliche Relationen einer Basisgröße in Bezug auf die Skalierung zweier Zielgrößen keine Auswirkung auf das Skalierungsverhalten der Wirkgröße mehr. Dies entspricht dem RD-Prinzip 1.
2. Der Entwickler führt die kritischen Relationen auf die Funktion, die durch die beteiligten Effekte realisiert wird, oder die Baustruktur zurück. Auf dieser Basis kann eine Modularisierung des Produkts stattfinden, die Effekte werden voneinander entkoppelt, indem sie von Unterschiedlichen und damit separat voneinander skalierbaren Modulen realisiert wird. Dies entspricht dem RD-Prinzip 2. Zu beachten ist jedoch, dass die Schnittstellen für alle zu realisierenden Modulkombinationen geeignet sind.<sup>368</sup>
3. Außerdem kann die Interaktion der beteiligten Effekte durch Anpassung der Gestalt angeglichen werden. Dies entspricht der klassischen halbähnlichen Baureihe und damit weitgehend dem RD-Prinzip 3.

Diese Möglichkeiten können zudem kombiniert werden, so ist Variante c) in Abbildung 7.8 streng genommen eine Kombination aus 2. und 3., wobei für die Varianz der Nutzereinflüsse 3. das ausschlaggebende Prinzip ist.

### Halbähnliche Baureihen

Die klassische Variante des Umgangs mit unvollständiger Ähnlichkeit ist die Synthese halbähnlicher Baureihen. Diese kommt insbesondere bei einfach zu überblickenden Abhängigkeiten und wenig komplexen Produkten oder bei Produkten mit nur lokal begrenzter Abweichung von vollständiger Ähnlichkeit in Frage. Der Ablauf der Synthese entspricht der Synthese nach WEBER, vgl. Abbildung 5.6. Die Ausarbeitung halbähnlicher Baureihen entspricht, a posteriori zu einer ersten Skalierung durchgeführt (entsprechend kBRE) auch dem Versuch der Unsicherheitsbeherrschung.

Die mit der nBRE einhergehende gründliche Systemanalyse a priori zur Skalierung ermöglicht es dem erfahrenen Entwickler, auch mit der konventionellen, korrigierenden Ableitung halbähnlicher Varianten Skalierungsunsicherheit zu beherrschen. Unerfahrene Entwickler sollten die Hinweise auf S. 132 berücksichtigen.

Die Synthese der halbähnlichen Baureihen beschränkt sich auf die Anpassung der Gestalt, da sie in der kBRE erst in sehr späten Phasen des BRE-Prozesses stattfindet. Für viele Probleme ist dieses Vorgehen ausreichend – beispielsweise bei der Kompensation von Modelleffekten wie dem Eigengewicht einer elastischen Struktur.<sup>369</sup> Hierzu und zu einigen weiteren Modelleffekten, auch der maßstabsabhängigen Fertigungsgenauigkeit, gibt ROTH Gestaltungshinweise, Ausschnittweise in Abbildung 7.10 dargestellt.<sup>370</sup>

### Produkte mit mehreren, divergent skalierenden, relevanten physikalischen Effekten

Sehr komplexe Produkte i. S. einer größeren Anzahl beteiligter physikalischer Effekte, vergleichbar dem Hochdrehzahlgetriebe im Evaluationskapitel, vgl. Abschnitt 8.1, erfordern ein gezieltes

<sup>368</sup> Die Schnittstellen müssen dieser Produktarchitektur Rechnung tragen, indem sie möglichst wenig größenabhängig sind. Es besteht die Möglichkeit der Anwendung der bMDM, vgl. Abschnitt 6.5. Die Synthese modularer Systeme ist nicht Fokus dieser Arbeit, wird jedoch ausführlich in der Literatur behandelt, vgl. VIETOR und STECHERT 2013, S. 838 ff. PIMMLER und EPPINGER 1994, FIRCHAU 2003, S. 40 ff.

<sup>369</sup> Vgl. hierzu auch die ausführliche Beschreibung des Einflusses des Strukturgewichts durch Kennzahlen bei WIEDEMANN 2007, S. 639-648.

<sup>370</sup> Vgl. ROTH 2000, S. 271.

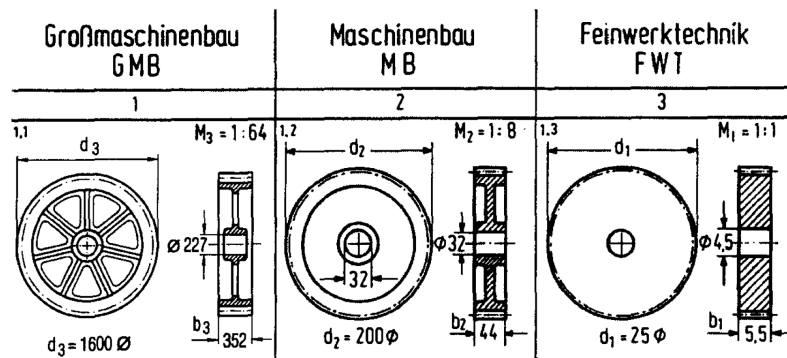


Abbildung 7.10: Verschiedene Gestaltungen eines Zahnrads je nach Maßstab des Produkts. Der Einfluss des überproportional wachsenden Eigengewichts kann kompensiert werden. Aus ROTH 2000, S. 271.

Vorgehen bei der Synthese. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass eine physikalisch ähnliche Skalierung dann aufgrund der Vielzahl verschiedenartiger Effekte und relevanten übergeordneten Anforderungen als ausgeschlossen gelten kann.

Hier bietet sich eine Zerlegung des Produkts in Gestaltungszonen mit ähnlichen physikalischen Effekten an, welche dann separat voneinander hinsichtlich ihres maßstabsabhängigen Verhaltens analysiert werden. Das so erlangte Wissen über das „natürliche“ maßstabsabhängige Verhalten einzelner Gestaltungszonen bildet die Grundlage für die Identifikation der skalierungskritischen Eigenschaften, äquivalent zu Unterabschnitt 7.3.2.

Nach der Identifikation der skalierungskritischen Eigenschaften können auf Basis der drei Prinzipien des Robust Design Lösungen gesucht werden, welche die Zahl der skalierungskritischen Eigenschaften und Relationen reduziert. Dadurch verringert sich die Komplexität des Skalierungsproblems.

Aus verschiedenen Teillösungen können im Anschluss prinzipielle Gesamtlösungen gebildet werden, von denen eine geeignete nach Auswahl und Bewertung weiter konkretisiert werden kann. Dieses Vorgehen ist insbesondere gegen Ende des Konzeptprozesses sinnvoll einzusetzen, da hier mögliche Teillösungen bereits bekannt sind und ohne großen Aufwand für besonders kritische Gestaltungszonen ein Vorgriff in die Phase des Entwurfs möglich ist. Das Ergebnis dieses divergent-konvergenten Vorgehens sind häufig Gesamtlösungen mit gestaltungszonenweise klar voneinander abgegrenzten Skalierungsmodellen. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 7.11 dargestellt.

#### 7.4.2 Absicherung durch Referenzprodukte

Ein Vorteil der Methoden der Modellwissenschaft ist, wie in Kapitel 2.2 hergeleitet, die Möglichkeit, Aussagen über die Skalierbarkeit von Systemen zu treffen, die sich einer vollständigen axiomatischen Beschreibung entziehen oder für die eine axiomatische Modellbildung zu aufwändig ist. Diesen Umstand kann der Entwickler sich auch bei der Absicherung einer Lösung zu nutze machen, über die nur ein geringes Maß an Information verfügbar ist.

Beispielhaft ist dies in Kapitel 8.1 für die Lagerung eines mit hoher Winkelgeschwindigkeit drehenden Planetenrades eines Getriebes gezeigt. Die Anwendung ist ebenfalls möglich im Rahmen der klassischen Übertragung von Versuchsergebnissen am Modell auf den Maßstab der Hauptausführung, ergänzt aber das in Kapitel 2.2.4 beschriebene Vorgehen um den Aspekt der Unsicherheitsbeherrschung. Dies geschieht durch die gezielte Separation von Informationen über unabhängige und abhängige Eigenschaften von Informationen über Stör- und Nebengrößen, welche

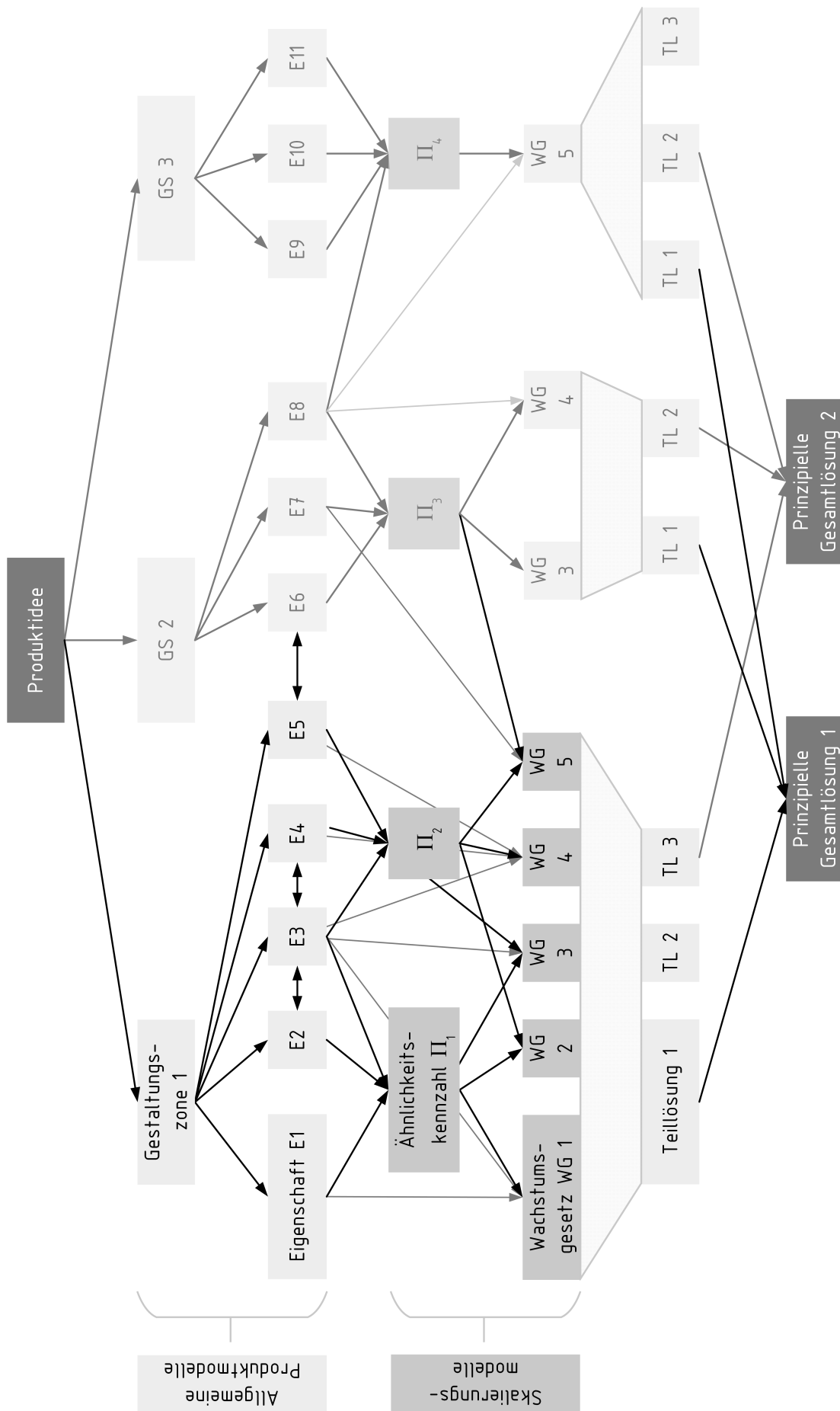


Abbildung 7.11: Vorgehen bei der Synthese komplexer Produkte. Die Dekomposition des Systems hilft bei der Beherrschung der Komplexität.

sonst in Skalierungsmodellen nicht dezidiert enthalten sind. Dadurch steigt die Genauigkeit des Skalierungsmodells.

Vereinfacht gesagt bedeutet dies: Ein hinreichend ähnliches Referenzprodukt wird gewählt, seine Eigenschaften werden mittels Ähnlichkeitskennzahlen auf das zu lösende Problem übertragen, wodurch entweder eine Aussage über die Funktionsfähigkeit einer bereits gestalteten Lösung getroffen, oder aber ein Stufensprung  $\varphi_L$  der geometrischen Abmessungen ausgehend vom Referenzprodukt berechnet werden kann. Im zweiten Fall kann der Schritt der Gestaltung verkürzt werden, sofern die skalierte Gestalt des Referenzprodukts realisierbar und anforderungsgerecht für das zu entwickelnde Produkt ist.

In Abhängigkeit des gewählten Ziels (vgl. Tabelle 7.1) wird grundsätzlich ein immer ähnliches Vorgehen durchlaufen, welches in einem Subvorgehensmodell zur nBRE in Abbildung 7.12 dargestellt ist.

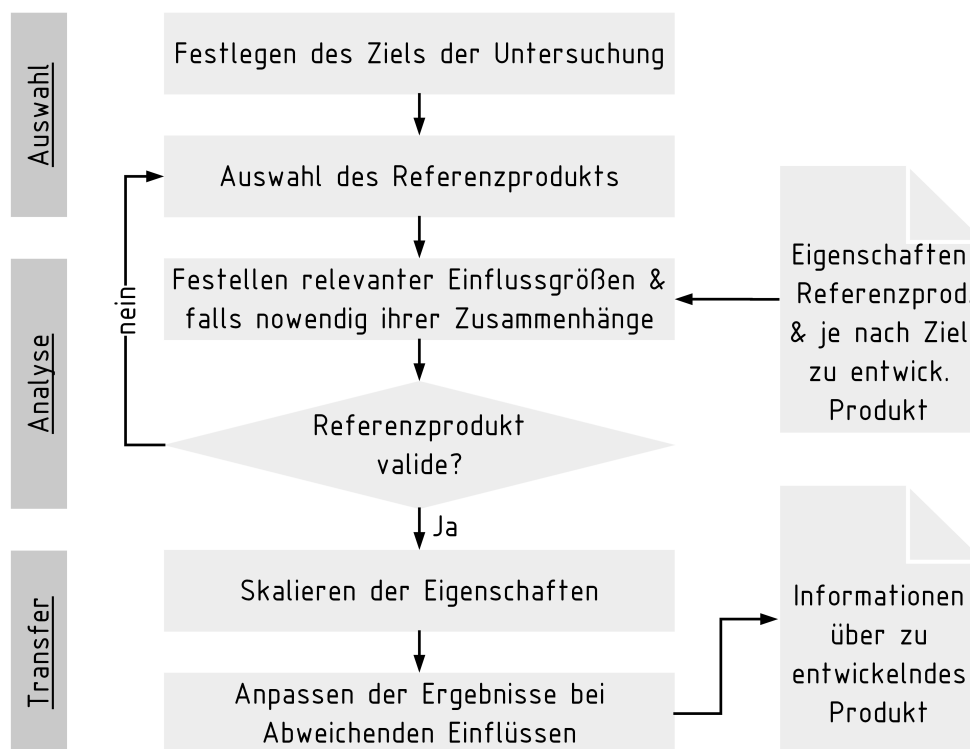


Abbildung 7.12: Vorgehen bei der Übertragung von Informationen aus Referenzprodukten auf zu entwickelnde Produkte.

Die Verwendung eines Referenzprodukts zur Absicherung von neu entwickelten Lösungen (oder zum Generieren von Startwerten für eine weitere Optimierung) unterliegt einigen Einschränkungen, die sich aus der Skalierungsunsicherheit ergeben. Die Ähnlichkeit der Systeme bemisst sich dabei insbesondere an der Ähnlichkeit der Prozesse und der Identität des Wirkprinzips: Das Verfahren muss identisch sein, verschiedene Stör- und Nebengrößen müssen jeweils in beiden Systemen eine ähnliche Relevanz und in einem ähnlichen Verhältnis zueinander stehen. Dies ist überprüfbar mit Ähnlichkeitskennzahlen zur Prozessbeschreibung.<sup>371</sup>

<sup>371</sup> Hierbei können über die relevanten Prozessgrößen mit den Methoden der Dimensionsanalyse Ähnlichkeitskennzahlen abgeleitet werden, ein vollständiger Satz von Ähnlichkeitskennzahlen erlaubt die Bewertung der physikalischen Ähnlichkeit eines Prozesses. Vgl. hierzu auch Abschnitt 2.2.

Alternativ, wenn sich die entsprechenden Einflüsse axiomatisch beschreiben lassen, kann von der strengen Ähnlichkeit der Stör- und Nebengroßeneinflüsse abgewichen werden, wenn ihr Einfluss beim Referenzprodukt aus der Messgröße herausgerechnet und die qualitativ und quantitativ korrekten Größen im zu entwickelnden Produkt berücksichtigt werden. In vielen dieser Fälle wird jedoch ein axiomatisches Modell zur Verfügung stehen, auf das zurückgegriffen werden kann. Die zur Absicherung notwendigen und hinreichenden Bedingungen sind in Ziel 1 in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Das zweite mögliche Ziel ist es, auftretende Unsicherheit mit Hilfe eines Referenzproduktes zu identifizieren. Liegen Referenzprodukt und zu entwickelndes Produkt bei Identität des Wirkprinzips bezüglich ihres Maßstabes so eng beieinander, dass nichtlineares Verhalten ausgeschlossen werden kann, und sind die wirkenden Stör- und Nebengrößen gleich, ist über eine Skalierung der Eigenschaften des Referenzprodukts auf den Maßstab des zu entwickelnden Produkts und den Abgleich mit dessen unter (teilweiser) Vernachlässigung von Unsicherheitsquellen möglichen Eigenschaften eine Aussage über das Vorhandensein weiterer Unsicherheitsquellen möglich. Ergibt sich eine Abweichung zwischen dem vom Referenzprodukt skalierten und dem abgeschätzten Wert. Sind nicht alle relevanten Unsicherheitsquellen in das Skalierungsmodell eingeflossen, das Modell ist zu erweitern. Die unbeabsichtigt vernachlässigte oder trotz unwissentlich hoher Relevanz beabsichtigt vernachlässigte Unsicherheit kann durch Analyse der Prozesse mit dem erweiterten Prozessmodell identifiziert und ggf. auch quantifiziert werden, vgl. Abschnitt 6.3. Dieses Vorgehen entspricht weiterhin dem UMEA-Zyklus zur Verbesserung von Skalierungsmodellen, vgl. Abschnitt 7.2.

Drittens bietet sich dem Entwickler die Möglichkeit, bei unvollständigen axiomatischen Modellen Unsicherheit zu quantifizieren. Dies ist möglich durch die Anwendung der Methoden zur Unsicherheitsskalierung, also Unsicherheitswachstumsgesetzen und/oder Skalierung von Unsicherheit via Dimensionsanalyse, vgl. Abschnitt 6.4. Sinnvoll ist dies, wenn verschiedene Punkte im  $\Pi$ -Raum des Problems am Referenzprodukt und ggf. am zu entwickelnden Produkt gemessen werden können. Bei bekannten  $m$  Eigenschaften der Relevanzliste können, wenn die Exponenten der dimensionslosen Kennzahlen bekannt sind, aus den  $n$  gesamten Einflussgrößen und Eigenschaften die unbekannten Eigenschaften oder Größen bestimmt werden, wenn für die Anzahl der bekannten Punkte  $p$  im  $\Pi$ -Raum gilt:

$$p = n - m \quad (7.1)$$

Mit diesen bekannten Punkten des  $\Pi$ -Raumes lassen sich die Exponenten der die unbekannten Einflüsse beschreibenden dimensionslosen Kennzahlen bestimmen, die Unsicherheit kann nun unabhängig von den vom Entwickler festgelegten Eigenschaften skaliert werden. Dies gilt, wenn die Wachstumsexponenten der einzelnen Unsicherheit verursachenden Größen gleich bleiben – entsteht Unsicherheit z.B. infolge von Fertigungstoleranzen, und werden beide Produkte in verschiedenen Verfahren hergestellt, bspw. generativ und spanend, werden sich i.A. die Wachstumsexponenten der Toleranzfeldbreite in Bezug auf den geometrischen Maßstab unterscheiden, eine Übertragbarkeit ist dann nicht mehr möglich.

Viertens kann mit einem ähnlichen Ansatz Unsicherheit auch ohne Kenntnis von Werten bei der Skalierung berücksichtigt werden; nämlich über die Ähnlichkeit der Unsicherheit. Es können auf Basis des  $\Pi$ -Theorems Ähnlichkeitskennzahlen für die Unsicherheit abgeleitet werden. Wird weiterhin physikalische Ähnlichkeit in Hinsicht auf die unsicheren Eigenschaften und Größen gewährleistet, sind die mit unbekannter Unsicherheit behafteten Informationen vom Referenzprodukt direkt auf das zu entwickelnde Produkt übertragbar.

---

Fünftens: Abschließend können mit Hilfe eines Referenzproduktes unsicherheitsbehaftete Modelle verifiziert werden – sind die Eigenschaften der beiden Produkte bekannt und sind entweder physikalische Ähnlichkeit, die vollständige Kenntnis der Wachstumsexponenten oder eine Identität von Stör- und Nebengrößen gewährleistet bzw. durch verifizierte Modelle bei Abweichung korrigierbar, können mithilfe skalierten Informationen über ein Referenzprodukt Modelle zur Vorhersage des Verhaltens des zu entwickelnden Produktes verifiziert werden – nämlich wenn die Modelle für den Maßstab des zu entwickelnden Produktes hinreichend ähnliche Ergebnisse liefern, wie die Skalierungsmodelle vom Referenzprodukt ausgehend prognostizieren. Auch dieses Vorgehen ist nur gültig, wenn bei der Skalierung keine große Nichtlinearität auftritt.



Ziel	Notwendige Bedingung	Hinreichende Bedingung
1. Bewährte Lösungen aus einem Referenzprodukt übernehmen oder für ein zu entwickelndes Produkt absichern	Eigenschaften des Referenzproduktes müssen in der betreffenden Gestaltungszone vollständig durch Modell oder Versuch bekannt sein.	Im Referenzprodukt dürfen keine Funktionen, die Stör- oder Nebengößeneinfluss kompensieren, vorhanden sein, die nicht auch im zu entwickelnden Produkt vorgesehen sind. Die Interaktionen mit der Umgebung und Störgrößen, denen Referenzprodukt und zu entwickelndes Produkt ausgesetzt sind, müssen möglichst ähnlich sein.
2. Identifikation auftretender Unsicherheit	Auftretende Stör- und Nebengrößen gleich.  Gleiche Wirkprinzipien.	Möglichst ähnlicher Maßstab bei Referenzprodukt und zu entwickelndem Produkt.
3. Quantifizierung von Unsicherheit bei unzureichenden axiomatischen Modellen	Alle Relevanten unabhängigen Eigenschaften müssen für Referenzprodukt und zu entwickelndes Produkt bekannt sein.  Falls keine vollständige physikalische Ähnlichkeit vorliegt, muss ein axiomatisches Modell für den Zusammenhang zwischen unabhängigen und abhängiger Eigenschaft vorliegen.	Exponenten der $\Pi$ -Faktoren sind bekannt.
4. Skalierung von Eigenschaften unter unbekannter Unsicherheit	Alle relevanten nominalen Eigenschaften in Referenzprodukt und zu entwickelndem Produkt sind quantitativ bekannt.  Physikalische Ähnlichkeit.	Kein maßstabsbedingter Wechsel der dominierenden Effekte.
5. Verifikation unsicherer Modelle	Abhängige und unabhängige Eigenschaften im Referenzprodukt sind bekannt.  Unabhängige Eigenschaften im zu entwickelnden Produkt sind festgelegt.	Exponenten der $\pi$ -Faktoren sind bekannt.  Der Einfluss von Stör- und Nebengößeneinflüssen ist gleich oder in beiden Produkten quantifiziert.

Tabelle 7.1: Problemstellungen, bei denen die Verwendung eines Referenzproduktes als Informationsquelle die Skalierungsunsicherheit reduzieren kann.

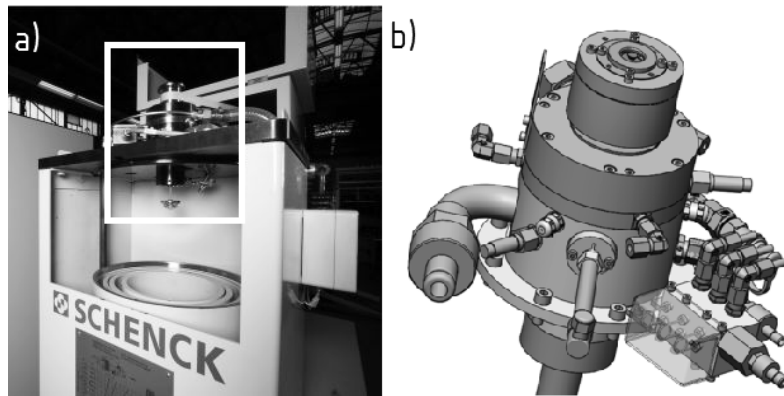


Abbildung 8.1: a) Abbildung des Prüfstandes (Bunker, Rotor, Getriebe). b) Grafisches Modell des Getriebes, Antrieb oben.

## 8 Evaluation

In diesem Kapitel werden verschiedene Methoden und Vorgehen einschließlich der zugrunde liegenden Modelle aus den vorherigen Kapiteln auf ein Praxisbeispiel aus einem Industrieprojekt angewandt. Um das Betriebsgeheimnis des Projektpartners zu wahren, wird auf Absolutwerte von Produkteigenschaften weitgehend verzichtet; im Rahmen der Baureihenentwicklung sind diese aber grundsätzlich von untergeordneter Bedeutung. Die Arbeit mit Verhältnisgrößen und dimensionslosen Kennzahlen ist zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Entwicklungsansatzes aus diesem Grund ausreichend.

### 8.1 Anwendung auf ein Hochdrehzahlgetriebe

Das der Evaluation zugrunde liegende Getriebe stammt aus einer Baureihe von Schleuderständen, wie sie für verschiedene Zwecke<sup>372</sup> vor allem im Bereich der Bauteilprüfung verwendet werden. Das Getriebe wird auf dem Deckel des Bunkers<sup>373</sup> befestigt, der Antrieb erfolgt über einen Riementrieb durch eine elektrische Maschine. Erwähnenswert ist zudem, dass der Bunker evakuiert wird, das Getriebe also neben der Hauptfunktion, eine Drehzahl umzuformen, eine Dichtungsfunktion wahrnimmt. Ein Prüfstand mit Rotor ist in Abbildung 8.1 zu sehen, ebenso ein Modell des Getriebes.

Das Getriebe ist abgeleitet aus einer Baureihe von Getrieben, die in verschiedenen Größen für verschiedene Rotorhöchstmassen und -Drehzahlen eingesetzt werden; hierbei handelt es sich hinsichtlich der Rotorhöchstmasse um ein Spektrum von 10 – 6.300 kg. Die Rotorhöchstdurchmesser reichen von 200 – 2700 mm; die Antriebsleistung von 7,5 – 250 kW, bei Rotormaximaldrehzahlen von 3.000 – 250.000 min<sup>-1</sup>. Diese Daten sind in Abbildung 8.2 aufgetragen.

Da das charakterisierende Merkmal des zu entwickelnden Getriebes die sehr hohe Drehzahl am Abtrieb ist, wird es im Folgenden Hochdrehzahlgetriebe (HDG) genannt.

#### 8.1.1 Aufbau des Hochdrehzahlgetriebes

Das HDG besteht aus einer Riemenscheibe, die über eine Spindel mit einem Hohlrad verbunden ist. Diese Spindel ist mit einer angestellten Lagerung (O-Anordnung) gelagert. Das Hohlrad ist Teil

<sup>372</sup> Materialverfestigung, Festigkeitsprüfung teils bis zum Bersten des Rotors, Zyklentests zur Ermittlung der Betriebsfestigkeit (LCF).

<sup>373</sup> Durchschlagsicherer Behälter, in dem der Rotor während der Prüfung gekapselt ist.

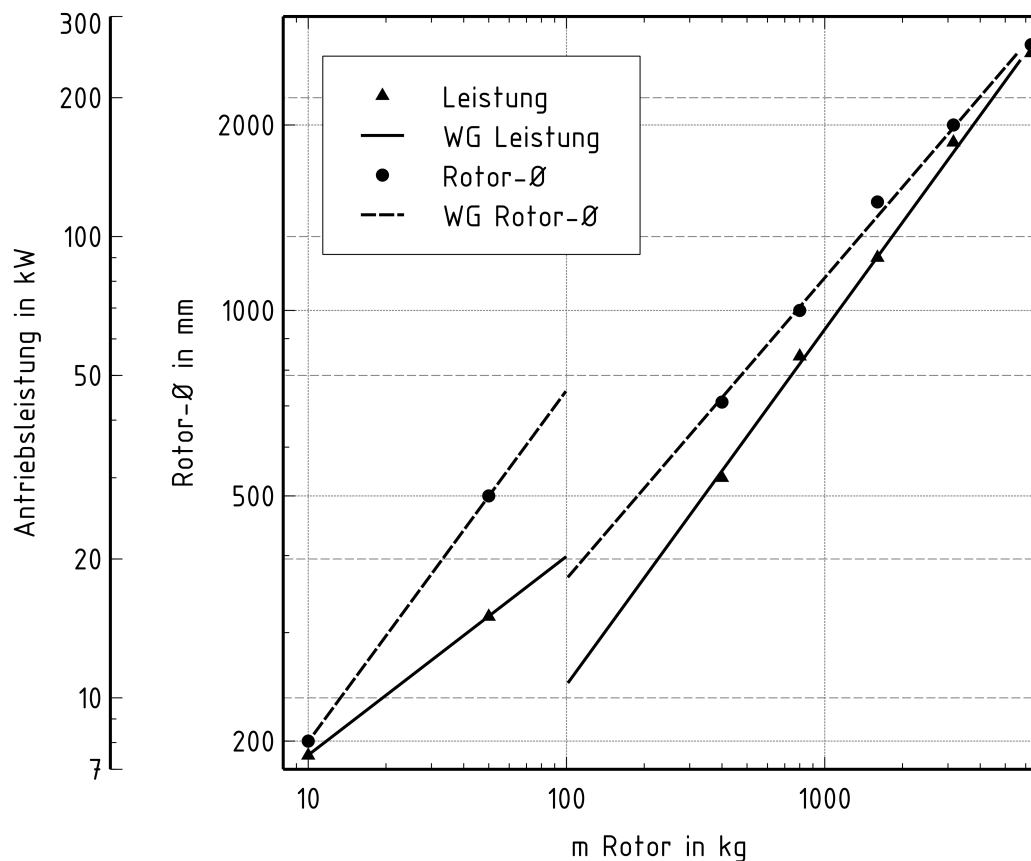


Abbildung 8.2: Diagramm der äußeren Eigenschaften der Hochdrehzahlgetriebe-Baureihe.

eines Planetengetriebes mit drei Planetenrädern, welche ebenfalls durch eine angestellte Lagerung (X-Anordnung) gelagert sind. Das Sonnenrad des Planetengetriebes ist in einem hydrostatischen axial und radial wirkenden Gleitlager gelagert und nimmt über eine formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung die Abtriebswelle auf. Auf dieser sitzt der Rotor. Die Abtriebswelle läuft durch ein sogenanntes Dämpfungslager, welches große Schwingungsamplituden beim Durchlaufen von Eigenfrequenzen dämpft; in diesem Zustand wirkt es als weiteres Radiallager mit Quetschöldämpfer. Das Getriebe ist durch einen Radialwellendichtring gegen die Vakuumkammer (Bunker), in der der zu schleudernde Rotor geprüft wird, gedichtet.

Ferner existieren Elemente zur Schmierstoffzufuhr. Lager und Verzahnungen werden mit einem Öl-Luft-Gemisch besprüht. Das hydrodynamische Gleitlager wird mit Öl aus einem getrennten Kreislauf versorgt.

Durch den externen Kühler und ein Ölreservoir ist gewährleistet, dass nach dem Warmlaufen während des Fahrzyklus immer eine konstante Öltemperatur im Zulauf zum Gleitlager gewährleistet ist.

Der Antrieb erfolgt über eine elektrische Maschine, die im Rahmen der Skalierung veränderbar ist (Antriebsdrehzahl, Riemenscheibendurchmesser). Zum Aufbau des Getriebes siehe Abbildung 8.3.

### 8.1.2 Warum eine konventionelle Baureihenentwicklung nicht möglich ist

Die zu entwickelnde Variante des Getriebes befindet sich mit einer Rotormasse von etwa 0,1 kg bei erheblich kleinerem Rotordurchmesser als in den bereits existierenden Varianten des Prüfstands

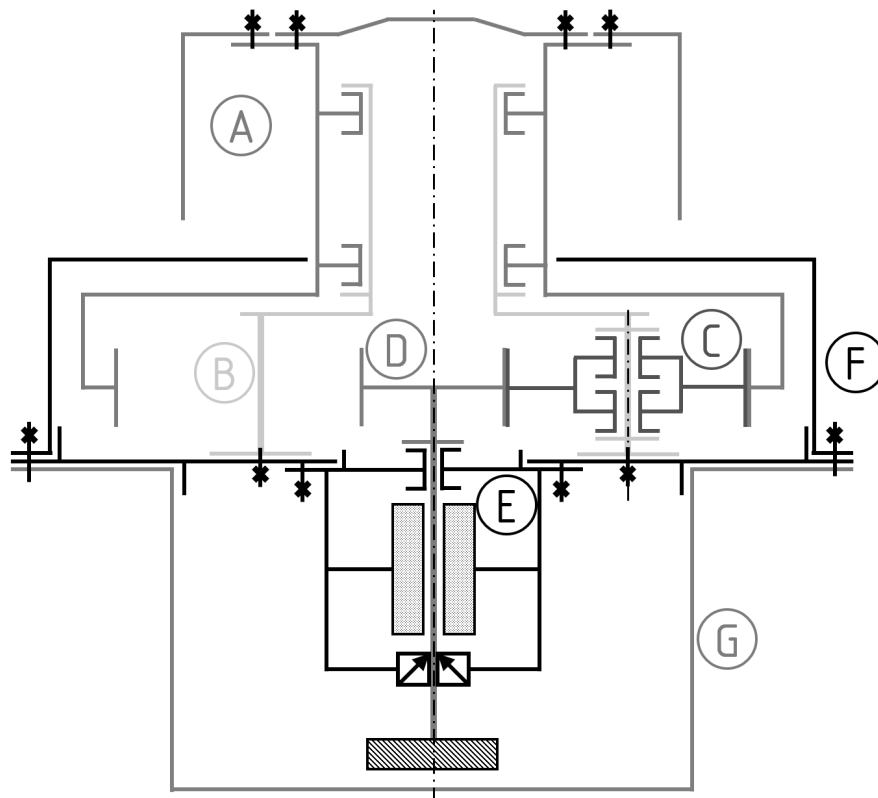


Abbildung 8.3: Prinzipskizze des Hochdrehzahlgetriebes. A) Spindelbaugruppe (Riemenscheibe, O-Lagerung, Hohlrad); B) Spindelachse/Planetenträger; C) Planeten inkl. Planetenlagerung (X-Anordnung); D) Sonnenrad mit Abtriebswelle; E) hydrodynamisches Axial-Radial-Gleitlager und Dämpfungslager; F) Getriebegehäuse; G) Bunker.

deutlich unterhalb der bisher kleinsten Variante mit 10 kg Rotormasse, vgl. Abbildung 8.2. Dagegen soll die maximal mögliche Drehzahl auf  $350.000 \text{ min}^{-1}$  erhöht werden.

Als vorwiegend mechanisches System ist die klassische vorgehensweise, eine Skalierung über die CAUCHY-Ähnlichkeit durchführen und im Nachgang Anpassungen am System vorzunehmen, um die Funktionserfüllung trotz der bei der Skalierung vernachlässigten Modelleffekte, bspw. durch die abweichend skalierende Hydrodynamik des Gleitlagers, zu gewährleisten. Aus

$$Ca = \frac{\rho \cdot (\omega L)^2}{E} \quad (8.1)$$

folgt, dass die geometrische Größe - bei unveränderten Materialeigenschaften - proportional zur Geschwindigkeitserhöhung abnehmen muss -  $\varphi_L = \varphi_\omega^{-1}$ . Die Drehzahlerhöhung beträgt  $\varphi_\omega = 1,4$ , eine Skalierung der Abmessungen mit  $\varphi_L \approx 0,71$ , ausgehend vom kleinsten schon existierenden Entwurf der Baureihe, führt also theoretisch zum Ziel.

Da jedoch aufgrund der Modularität<sup>374</sup> ebenso wie aufgrund übergeordneter Normen<sup>375</sup> und zudem einige Wärme- und Stofftransport-Phänomene zur Funktionsfähigkeit des Getriebes bei-

<sup>374</sup> Eine Kompatibilität zu den Nebenfunktionen realisierenden Systemen wie Ölkühler und -pumpe und Bunker ist zu gewährleisten.

<sup>375</sup> Ein Stufensprung von 0,71 ist in den Normzahlreihen R40 und R80 enthalten, vgl. DIN 323-1 1974, S. 1 f., so fein sind aber beispielsweise Schrauben nicht gestuft.

---

tragen<sup>376</sup>, kann die vollständige Ähnlichkeit zum Grundentwurf nach der Skalierung keinesfalls realisiert werden, vgl. Abschnitt 2.2.5.

Weiterhin kommt eine übergeordnete Anforderung hinzu - der Entwicklungsaufwand für die neue Produktvariante soll so klein wie möglich gehalten werden, die Anzahl geometrischer Anpassungen soll also im Sinne der maximalen Verwendung von Gleichteilen über die Baureihe hinweg minimiert werden. Dies ist zudem im Sinne der Fertigung des Getriebes, da bei geometrischer Verkleinerung einige Komponenten wie die Abtriebswelle nicht mehr oder nur zu sehr hohen Kosten zuverlässig innerhalb der Spezifikationen gehalten werden können.

Zu diesen klassischen Gründen für Halbähnlichkeit kommen weitere Probleme hinsichtlich der Skalierung hinzu, die sich aus der hohen epistemischen Unsicherheit des Systems ergeben: Wie Abbildung 8.2 zeigt, zerfällt die existierende Baureihe offenbar in zwei Bereiche, die entweder eine unterschiedliche Ausnutzung des Materials aufweisen, oder nach unterschiedlichen Gesetzen skalieren. Von letzterem ist auszugehen, da für das am schnellsten laufende Getriebe mit etwa  $250.000 \text{ min}^{-1}$  am Abtrieb, vgl. Abbildung 8.2, welches die Ausgangsbasis für die Skalierung darstellt, verschiedene Komponenten (Wälzlager, Radial-Wellendichtring) bereits außerhalb der vom Hersteller freigegebenen Spezifikationen betrieben werden.

Das hydrodynamische Gleitlager wird zudem im vollturbulenten Bereich<sup>377</sup> betrieben, vgl. S. 152. Zur Beschreibung des Verhaltens des Gleitlagers im turbulenten Bereich existieren, insbesondere für das Axialgleitlager, nur wenige Modelle, diese widersprechen sich teilweise in Hinblick auf die Verlustleistung.<sup>378</sup> Die bereits etwa zwei Jahrzehnte zurückliegende Entwicklung des Getriebes wurde daher teilweise auf Versuche im Maßstab der Hauptausführung gestützt durchgeführt, weshalb für viele Gestaltungszonen kein gesichertes, auf axiomatischen Modellen basierendes Wissen über das Verhalten der Systemelemente vorliegt, außer dass sie bis etwa  $250.000 \text{ min}^{-1}$  ihre Funktion erfüllen.

In der Folge führen also zwei Gründe dazu, dass eine klassische Baureihenentwicklung nicht zulässig ist: Halbähnlichkeit ist von vornherein das Ziel (Gleichteile, minimierter Entwicklungsaufwand), während eine bereichsweise schwache Informationslage (hohe epistemische Unsicherheit) hinsichtlich der physikalischen Effekte und der Betriebszustände im Grundentwurf eine einfache Vorhersage der Skalierungsgrenzen unmöglich macht, mithin also die Skalierbarkeit stark erschwert.

---

### 8.1.3 Vorgehen

---

Das Vorgehen bei der Baureihenerweiterung basiert auf den Produktmodellkonkretisierungsstufen nach Abbildung 4.2. Die Rahmenbedingungen an die Skalierung werden durch die Analyse der Anforderungen berücksichtigt, die Funktionsstruktur wird, da das Getriebe Teil eines modular aufgebauten Systems ist, am Rande angeschnitten, wenn es um die Abgrenzung skalierungsrelevanter Gestaltungszonen geht, vgl. Abbildung 8.4. Die Analyse der physikalischen Effekte ist ein zentraler Punkt in der Bestimmung skalierungsrelevanter Interaktionen im System, während ein großer Teil der Synthese auf der Gestaltebene betrieben wird.

#### Anforderungsanalyse

Die Analyse der Anforderungen erfolgt mit dem Fokus auf die Auswirkungen einzelner Anforderungen auf den Skalierungsprozess und die Skalierbarkeit des Systems. Die Anforderungen an den

---

<sup>376</sup> Beispielsweise die teilweise konvektive Verteilung eines Ölnebels zur Schmierung einiger Gestaltungszonen.

<sup>377</sup>  $Re_{41,3} \cdot \psi_{\text{eff}}^{-0,5}$ , vgl. DIN 31652-1 2017, S. 7.

<sup>378</sup> Vgl. DIN 31652-1 2017, S. 13 ff., VDI 2204 1992, S. 3, LEIMANN 1982, S. 36, LEONHARD 1984, S. 83 ff., S. 97, sowie WILCOCK und BOOSER 1957, S. 231.

zu erstellenden Folgeentwurf sind bereits in Abschnitt 8.1.2 angesprochen, die Bereichsforderung der Drehzahlerhöhung um mindestens 40% sowie der Wunsch nach möglichst weitgehender geometrischer Ähnlichkeit sind, neben der Notwendigkeit, die Betriebsfestigkeit auch für die LCF-Tests zu gewährleisten, die einzigen expliziten Anforderungen, die die Skalierbarkeit direkt beeinflussen. Hinzu kommen übergeordnete Normen, vulgo die Verwendung von Normteilen bei Lagern, Dichtungen und Verbindungselementen, der Verzahnung des Planetengetriebes sowie das aus dem Wunsch nach geringst möglichem Entwicklungsaufwand und niedrigen Kosten resultierende Ziel der Nutzung „von der Stange“ zu beziehender Komponenten für Riementrieb und Gleitlager.

Für die Skalierung bedeutet dies, dass vor einer Änderung geometrischer Eigenschaften abgewogen werden muss, welche Auswirkung sie auf das restliche Produkt haben.

### Funktionen

Die Analyse der Funktionsstruktur erfolgt im Rahmen der Darstellung der Baustruktur des Getriebes, vgl. Abbildung 8.4. Hierbei lassen sich bereits Gestaltungszonen identifizieren, die bei der Skalierung zusammen betrachtet werden müssen, während andere Gestaltungszonen voneinander losgelöst betrachtet werden können. Das siebenschrittige Vorgehen gestaltet sich wie folgt:

1. Identifikation der zu skalierenden Flüsse aus den Anforderungen/der Entwicklungsaufgabe, vgl. S. 142
2. Identifikation der Hauptfunktion bzw. der Abfolge von Teilfunktionen, die die Hauptfunktion realisieren
3. Identifikation von Nebenfunktionen des Produkts
4. Zuordnen von Bauteilen zu Haupt- oder Nebenfunktionen
5. Darstellen der Flüsse zwischen den Elementen, sowohl gewollter als auch ungewollter Flüsse (Abbildung des Verhaltens, vgl. Abbildung 4.7)
6. Ableiten von Modulen aus Bauteilen, die zur selben Funktion beitragen
7. Einstufung der Module hinsichtlich der technischen Schwierigkeit der Skalierung

Die Hauptfunktion des Getriebes aus Sicht der Skalierung leitet sich aus der Anforderung der Drehzahlsteigerung ab: Das Umformen der mechanischen Energie von Antrieb zu Abtrieb ist das Ordnungskriterium der Skalierung, der relevante Fluss ist der Energiefluss vom Wandler (elektrische Maschine) bis zum Prüfling (Turbo-Rotor). Für das HDG und die zum Betrieb notwendigen Nachbarsysteme lässt sich feststellen, dass die Majorität der Bauteile des Getriebes zur Realisierung der Hauptfunktion benötigt wird. Die einzige hierzu essenzielle Nebenfunktion ist die Bereitstellung von Führung und Lagerung für einige dieser Bauteile, dies kann anhand der vielfältigen Beeinflussung dieser Funktionsträger durch von den Hauptfunktionsträgern ausgehenden Energieflüssen identifiziert werden. Die weiteren Nebenfunktionen sind infrastruktureller Natur und im Rahmen der quasi beliebigen Verfügbarkeit von Ressourcen<sup>379</sup> als unkritisch für die Skalierung zu sehen - Luft- und Ölmengen sowie -drücke können leicht skaliert werden, falls notwendig, ebenso gilt dies für die zum Betrieb benötigte elektrische Energie und den durch eine Verkleinerung des Rotors (Masse und Durchmesser) unkritischen bereits vorhandenen Bunker.

<sup>379</sup> Schleuderstände werden in der kontrollierten Umgebung eines Technikums oder Labors betrieben.

Die bei den existierenden Baureihengliedern getroffene Einteilung der Module kann als zweckmäßig für eine Drehzahlskalierung betrachtet werden. Der Fokus der weiteren Bearbeitung wird auf die die Hauptfunktion realisierenden Elemente und die Elemente zur Führung und Lagerung gelegt. Die Systemgrenze künftiger Betrachtungen umfasst also exakt das HDG und den Prüfling, Interaktionen mit Nachbarsystemen sind in diesem speziellen Fall nicht tiefergehend zu betrachten. Dies kann für Systeme mit stärkeren oder schwierig zu skalierenden Interaktionen der Module mit Nachbarsystemen oder der Umwelt anders aussehen, bspw. wenn eine Mensch-Maschine-Schnittstelle stark mit einem Kraft umformenden Modul wechselwirkt, vgl. Unterabschnitt 7.4.1.

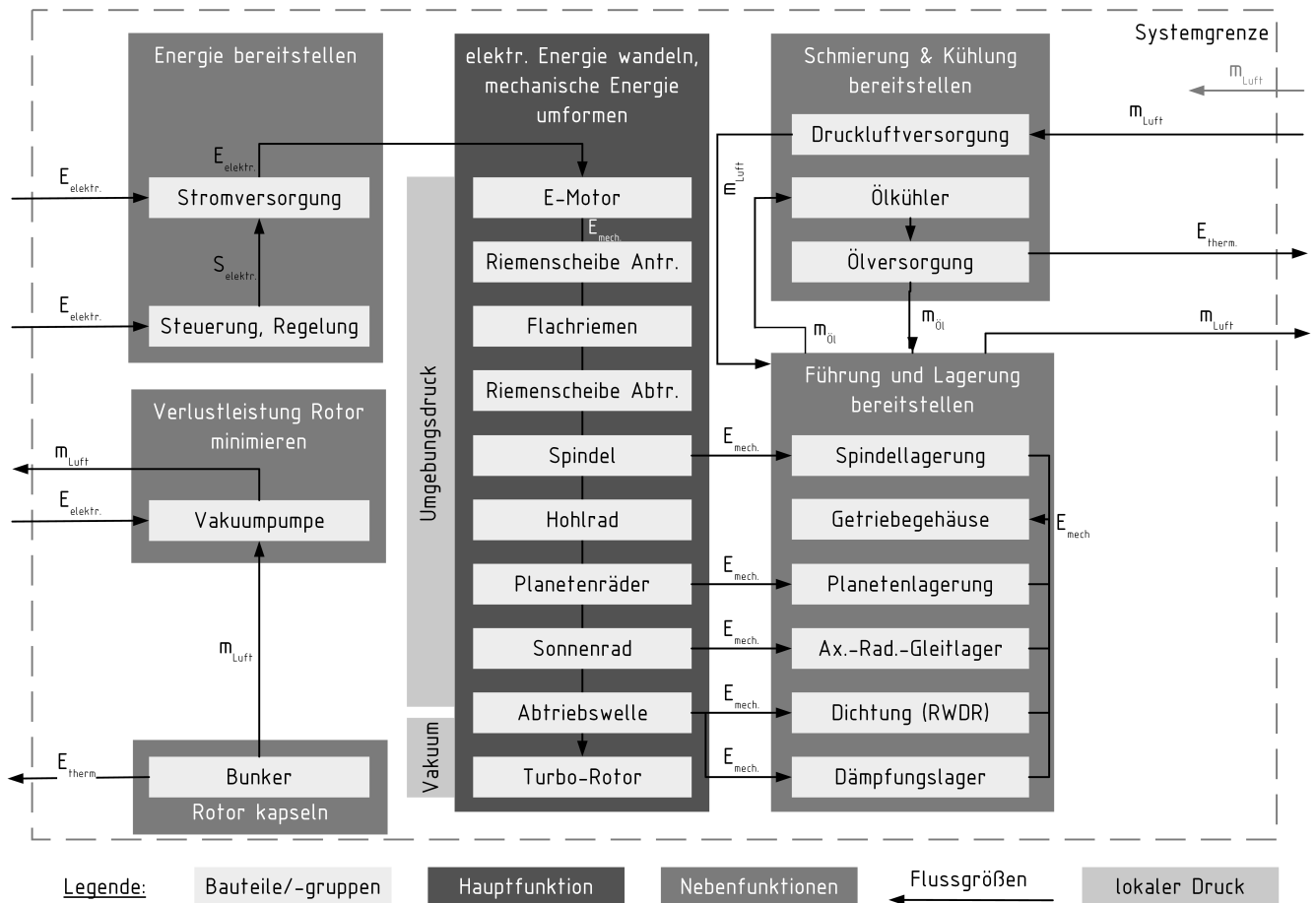


Abbildung 8.4: Baustruktur des Hochdrehzahlgetriebes als weniger abstrakte qualitative Darstellung der Funktions-Bauteil-DMM sowie von Ausschnitten Effekt-Bauteil und Funktions-Effekt-DMM und der jeweiligen Inversen.

## Physikalische Effekte

Wie bereits in den Abschnitten 2.2 und 6.5 hergeleitet, bilden physikalische Effekte die Grundlage der Skalierung mit Ähnlichkeitsgesetzen. Auch bei eingeschränkter Ähnlichkeit wie beim HDG liefert die Analyse der physikalischen Effekte und insbesondere ihrer Relationen untereinander einen zentralen Beitrag zur Unsicherheitsbeherrschung.

Hinsichtlich des HDG lassen sich die physikalischen Effekte mit geeigneten Ähnlichkeitskennzahlen verknüpfen, anhand derer erste Aussagen über die Relevanz von Stoffeigenschaften oder Geometrieigenschaften für die Skalierung von Zustandsgrößen wie der Winkelgeschwindigkeit



---

oder von Kräften haben. Daraus können erste Aussagen über eine Kompatibilität der realisierten Varianten zweier Teillösungen getroffen werden.<sup>380</sup>

Auch in Bezug auf die Unsicherheitskategorie des Unwissens kann die Beachtung der physikalischen Effekte nützlich sein; werden zwei physikalische Effekte von einer gemeinsamen Menge an Eigenschaften beeinflusst, und ist das Phänomen eines der beiden Effekte nur schwer axiomatisch oder empirisch zu beschreiben, während dies für den zweiten Effekt gelingt, bietet es sich an, Ähnlichkeit hinsichtlich des schwer oder nur mit großer Unsicherheit zu beschreibenden Effekts zu wahren, und anhand der vorliegenden Modelle für den einfacher zu beschreibenden Effekt Wachstumsgesetze für eine halbähnliche Skalierung zu gewinnen.

Dies wurde am Beispiel der Planetenräder realisiert - die Grobgeometrie und Umfangsgeschwindigkeit des skalierten Systems weichen nur wenig vom Grundentwurf ab, wodurch eine annähernde Ähnlichkeit für Strömung und Wärmeleitungs- und Übergangsphänomene<sup>381</sup> gewährleistet ist. Die Kräfte und Beanspruchungen ändern sich jedoch aufgrund der veränderten Lagerung, des geänderten Moduls der Verzahnung und des abweichenden zu übertragenden Moments – eine mechanische Ähnlichkeit ist hier nicht mehr gegeben, ein detailliertes Wachstumsgesetz muss für die Pressung im Zahnkontakt aufgestellt und berücksichtigt werden.

### Zusammenfassung des Vorgehens

Auf dieser Basis können die Skalierungsgrenzen der jeweiligen Baugruppen ermittelt werden. Weiterhin lassen sich durch Kategorisierung der jeweils an der Drehzahlskalierung beteiligten Parameter sowie dem Ermitteln der für die Skalierung jeweils möglichen Wertebereiche und Sensitivitätsanalysen die skalierungsrelevanten Produkteigenschaften ermitteln. Abschließender Schritt der Analyse ist die Überprüfung der indirekten Relationen im Getriebe, also die Betrachtung von Neben- und Störgrößen. Störgrößen treten beim HDG nur im geringen Maß auf, da das Getriebe in einer kontrollierten Umgebung eingesetzt wird. Es wirken kaum Einflüssen aus der Umwelt auf das System ein. Durch die vielen verschiedenen physikalischen Effekte innerhalb des Systems und die große Anzahl an Nebengrößen liegt für die Getriebeskalierung eine hohe Komplexität vor.

Die Synthese von Lösungen zur Drehzahlskalierung des Getriebes basiert auf der Erweiterung der vorher ermittelten Skalierungsgrenzen und konzentriert sich auf zwei Strategien: die Arbeit an den im Analyseprozess identifizierten skalierungsrelevanten Parametern, sowie die Variation von Wirkstrukturen, Wirkprinzipien und Teilweise auch physikalischen Effektklassen. Die zuvor ermittelten skalierungsrelevanten Produkteigenschaften bzw. Wirkstrukturen/-prinzipien und Effekte werden systematisch variiert und kombiniert, die generierten Lösungen hinsichtlich ihrer Drehzahlfestigkeit und der Erfüllung der anderen Anforderungen bewertet und hinsichtlich ihrer Skalierungsrobustheit evaluiert.

---

#### 8.1.4 Analyse der Skalierungsgrenzen

---

Die Skalierungsgrenzen für das HDG wurden für jede Gestaltungszone separat ermittelt. Hierfür wurden zwei grundsätzliche Vorgehen verwendet:

1. Das Ableiten von Wachstumsgesetzen auf Basis axiomatischer Modelle, das Absichern des Gültigkeitsbereichs dieser Modelle und daran anschließend das Berechnen der Ist-Eigenschaften

---

<sup>380</sup> Zur Erinnerung (vgl. Kapitel 2.2.3), ein Punkt im II-Raum kann durch unendlich viele Lösungen repräsentiert werden, die sich alle Ähnlich verhalten.

<sup>381</sup> Unter der Voraussetzung, dass ein Großteil des Wärmetransports durch erzwungene konvektive Vorgänge mit Öl-Luft-Nebel stattfindet.

skalierter Lösungen. Diese Ist-Eigenschaften wurden dann mit den Soll-Eigenschaften und den Restriktionen, bspw. Werkstofffestigkeiten, verglichen.

2. Für Bereiche, in denen keine zuverlässigen Informationen über die Beanspruchungsgrenze der Komponenten beschafft werden konnten und für Komponenten, die bereits im nicht drehzahlskalierten Getriebe außerhalb der vom Hersteller freigegebenen Spezifikationen genutzt werden, wurden Beanspruchungsmodelle aufgestellt, und die Beanspruchung wurde als Randbedingung der Skalierung konstant gehalten oder verringert.

Diese Vorgehensweisen greifen auf die Modelle der Abschnitte 6.4 und 6.5 zurück, das methodische Vorgehen bei der Skalierung entsprach den UMEA-Derivaten für die Baureihe, vgl. Abschnitt 7.2 und den Analysemethoden aus Abschnitt 7.3.

Das Ergebnis ist in Abbildung 8.5 dargestellt. Die gewählte Lösung entspricht einer Kombination von Teillösungen, deren Eigenschaften mit annehmbarer Unsicherheit antizipiert werden können, und die größere korrigierende Anpassungen am HDG vermeiden soweit möglich. Kann die Zykluszeit mit dieser Lösung voraussichtlich konstant gehalten werden.

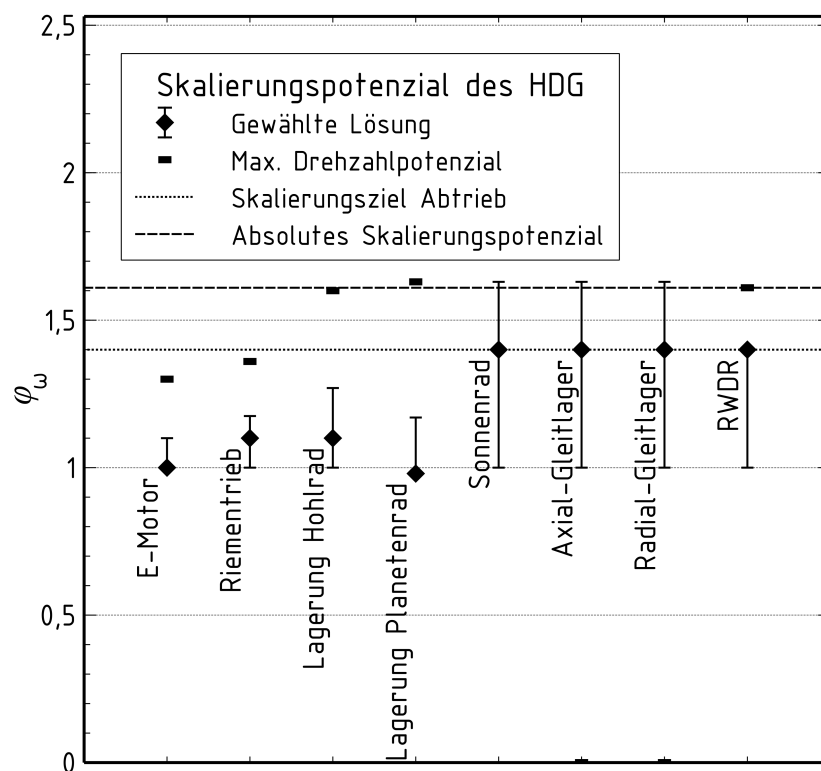


Abbildung 8.5: Skalierungspotenziale des HDG.

Dabei wurden in Gestaltungszonen, die durch Informationsmangel von großer Modellunsicherheit betroffen sind konservativere Lösungen und Annahmen gewählt, als in Gestaltungszonen, deren Verhalten mit großer Determiniertheit quantifiziert und bewertet werden konnte. Hierdurch erklären sich die unterschiedlich hohen Ausnutzungen relativ zur Teillösungsspezifischen Drehzahlgrenze. Dabei ist zu beachten, das hinsichtlich der Drehzahl gekoppelte Bauteile zu einer unterschiedlichen Ausnutzung führen können – das höher ausgenutzte Skalierungspotenzial beim Riementrieb sorgt für

---

eine vergleichsweise niedrig beanspruchte Lagerung von Hohlrad und Spindel, da auch hier einfache Anpassungen vorgenommen wurden, die das Drehzahlpotenzial gegenüber dem Grundentwurf erhöhen, vgl. S. 149 (die Ausführungen zur Planetenlagerung können auf die Lagerung des Hohlrades übertragen werden).

Durch die Abschätzung der Skalierungsgrenzen konnten im Kontext der Relationen von Gestaltungszonen zueinander Entwicklungsschwerpunkte definiert werden.

---

### 8.1.5 Identifizieren von Schwerpunkten der Synthese

---

Durch die Abschätzung der Skalierungsgrenzen konnten im Kontext der Relationen von Gestaltungszonen zueinander Entwicklungsschwerpunkte definiert werden.

Der hoch ausgelastete Riementrieb profitiert von einer niedrigen Leistungsanforderung des restlichen Getriebes. Das führte zur Erkenntnis, dass Verluste und unnötig große Trägheiten im Getriebe verringert werden sollten.

Als zentraler Verursacher von Verlusten fällt das hydrodynamische Gleitlager auf. Das Axialgleitlager des Grundentwurfs ist für den im skalierten Entwurf eingesetzten Rotor erheblich überdimensioniert. Auch das Radialgleitlager ist – wenngleich weniger stark – überdimensioniert und zudem der mit Abstand größte Verursacher von Verlusten im Getriebe.

Die Position weit stromabwärts im Getriebe führt dazu, dass die Gleitlagerverluste einen hohen unerwünschten Einfluss i.S. von erhöhter Belastung auf eine hohe Anzahl weiterer Komponenten ausübt.

Die Modellierung der Relationen innerhalb des Getriebes auf der Ebene physikalischer Effekte und der Wirkprinzipien führte zu einer zielführenden Priorisierung der Gestaltungszonen.

---

### 8.1.6 Ergebnisse

---

Erreicht wurden durch den Einsatz von Methoden der nBRE einige konstruktiven Verbesserungen ebenso wie eine Minimierung des zu leistenden Entwicklungsaufwandes:

- Gleichmäßigere Ausnutzung der Beanspruchbarkeit über das Getriebe hinweg.
- Größeres Skalierungspotenzial für weitere Drehzahlerhöhungen.
- Teilweise Reduktion der Beanspruchung trotz Drehzahlerhöhung.
- Deutlich verbessertes Systemverständnis und Reduktion epistemischer Unsicherheit durch vertiefte Analyse von Produkt, Prozessen und Produktmodellen.

Dabei wird in der folgenden Darstellung der Syntheseergebnisse auch auf die in den verschiedenen Bereichen gefundenen Skalierungsgrenzen und ihre Berücksichtigung eingegangen. Ebenso wird exemplarisch auf die Identifikation von für die Skalierung besonders günstig zu beeinflussenden Produkteigenschaften eingegangen, vgl. S. 147 ff.

Abschließend wird ein per kBRE und nachgelagerter korrektiver Iteration erstellter Vergleichsentwurf eines versierten und erfahrenen Entwicklers vorgestellt. Dieser wird den unabhängig davon auf Basis der nBRE generierten Lösungen gegenübergestellt, vgl. S. 155.

### Riementrieb, Spindellagerung und Hohlrad

Die beiden erarbeiteten Gestaltvarianten der Spindellagerung und der getriebenen Riemenscheibe unterschieden sich in ihrem Skalierungspotenzial hinsichtlich der Drehzahl, vgl. Abbildung 8.9.

Variante a) entspricht der geometrisch aus Platzgründen nicht mehr durch Verkleinern hin zu höheren Drehzahlen zu skalierenden Lösung im Referenzprodukt. Eine Drehzahlerhöhung kann nur durch eine Vergrößerung der angetriebenen Riemenscheibe erfolgen, wodurch die Trägheit des Systems steigt. Dafür ist der Konstruktionsaufwand jedoch minimal. Einzige Änderung ist die Verwendung von Hybridkugellagern zur Reduktion der Lagerbeanspruchung.

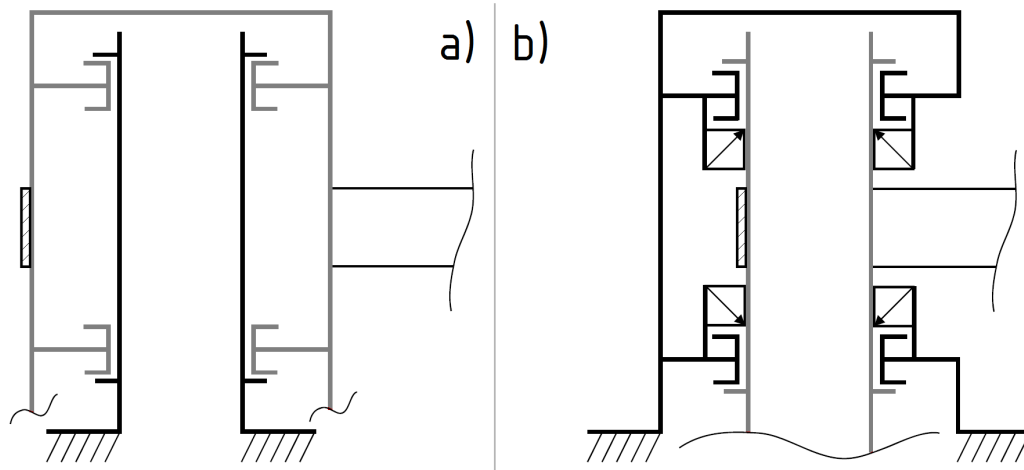


Abbildung 8.6: Unterschiedliche Gestaltungsvarianten der Spindellagerung. a) Gestaltung des Referenzprodukts. b) Gestaltung mit größerem Skalierungspotenzial.

Variante b) basiert auf der kinematischen Umkehr der Lagerung. Durch drehende Innenringe wird die Käfigdrehzahl reduziert, die Drehzahlfestigkeit der Lagerung erhöht sich. Gleichzeitig können deutlich kleinere Riemenscheibendurchmesser der getriebenen Scheibe realisiert werden, wodurch bei gleichzeitiger Verringerung der Trägheit des Rientriebs die Übersetzung in einem weiten Bereich bis hin zu einem Skalierungsfaktor der getriebenen Riemenscheibe von  $\varphi_{d,RS,g} = 0,73$  angepasst werden kann. Damit können allein durch Reduktion des Riemenscheibendurchmessers, den drehenden Innenring und die erhöhte Drehzahlfestigkeit der Hybridlager Drehzahlerhöhungen an der Spindel bis  $\varphi_{\omega,s} = 1,37$  realisiert werden, was – vorausgesetzt die Beanspruchung der Gestaltungszonen stromabwärts kann konstant gehalten werden – bereits 98 % der benötigten Drehzahlerhöhung ermöglicht.

Im Rahmen der Skalierung wird die Drehzahl der Spindel durch eine Erhöhung des Durchmessers der antreibenden Riemenscheibe um etwa 10 % oder Alternativ durch eine äquivalente Erhöhung der Motordrehzahl um eben diese 10 % erhöht. Diese Entscheidung beruht auf dem Prinzip, alle Gestaltungszonen gleichmäßig auszunutzen: Die Umfangsgeschwindigkeit der Verzahnung soll nicht zu sehr steigen, da mit ihr das Risiko einer verschlechterten Schmierung durch Abschleudern des Öls steigt. Ändern sich die Schmierungsverhältnisse, kann die am Grundentwurf erprobte Beanspruchung der Verzahnung nicht als für das skalierte HDG akzeptabel angesehen werden.

### Verzahnung und Übersetzung

Um die nach der Erhöhung der Spindeldrehzahl noch notwendigen 27 % Drehzahlerhöhung in der Getriebestufe zu realisieren wird, um den Konstruktionsaufwand zu minimieren, die Geometrie von Hohlrad und Planetenrädern weitgehend unangetastet gelassen. Der Teilkreisdurchmesser des Sonnenrades wird reduziert, der Teilkreisdurchmesser der Planetenräder erhöht. Um die Lösung zur Befestigung der Schleuderwelle im Sonnenrad beizubehalten muss der Zahnmodul verringert werden, um den Teilkreisdurchmesser des Sonnenrades adäquat zu verringern, ohne den

Fußkreisdurchmesser, der durch die Differenzialbauweise von Sonnenrad und Schleuderwelle limitiert ist, stark zu verringern. Dies zieht eine Erhöhung der Breite der Verzahnung nach sich, um gleiche Flankenpressungen zu erreichen. Aus der geometrisch ähnlichen Skalierung der Flankenkontur folgt, dass die Zahnbreite bei gleicher Zahnkraft und gleichem Teilkreisdurchmesser umgekehrt proportional zur Änderung des Zahnmoduls wachsen muss:

$$\varphi_{b,z} = \varphi_m^{-1} \quad (8.2)$$

Das Getriebegehäuse bietet Raum für eine Erhöhung der Zahnbreite um  $\varphi_{b,z} \leq 2$ , der Zahnmodul wird auf  $\varphi_m = 2/3$  reduziert, dies ist ausreichend zur Erhöhung des Übersetzungsverhältnisses  $i$  um  $\varphi_i = 1,27$  in der Planetenstufe. Es verbleibt eine Reserve von  $0,5 \cdot b_{z,0}$ , die zur Senkung der Flankenpressung im Falle steigender Zahnkräfte durch höhere Verluste stromabwärts verwendet werden kann. Hierdurch wird die maximale Erhöhung der Reibmomente und -Kräfte definiert.

Der Teilkreisdurchmesser der Planeten wird um  $\varphi_{D,p} = 1,12$  erhöht. Durch den konstanten Hohlradteilkreisdurchmesser ergibt sich die Änderung der Winkelgeschwindigkeit der Planeten zu

$$\varphi_{\omega,p} = \varphi_{D,p}^{-1} \cdot \varphi_{\omega,s} = 1,1/1,12 = 0,982 \quad (8.3)$$

Dies ist relevant für die Skalierung der Planetenlagerung im nächsten Abschnitt.

Die Drehträgheit der Planeten steigt aufgrund der größeren Breite und des drehenden Innenrings an, vgl. Abschnitt „Planetenräder und Planetenlagerung“.

### Planetenräder und Planetenlagerung

Bei der Synthese der Lösungen für die Planetenlagerung werden verschiedene Prinzipien beachtet: Grundidee ist die konstante HERTZ'sche Pressung im Wälzkontakt, bei gleicher Pressung und gleichem schwächsten Werkstoff (Lagerringe aus 100Cr6) verglichen mit dem Referenzprodukt muss aufgrund lokal vorliegender mechanischer Ähnlichkeit im Wälzkontakt eine Funktionsfähigkeit der Lösung gegeben sein. Diese Annahme kann getroffen werden, weil sich Stör- und Nebengrößen nicht ändern und im Rahmen des kontrollierten Laborbetriebs auch kaum Auftreten. Relevant ist hier die später bei der rotordynamischen Auslegung zu beachtende Auswirkung einer Anpassung von Steifigkeiten und Trägheiten auf Nachbarsysteme.

Darüber hinaus wird die Skalierbarkeit durch die Veränderung der Relationen in den Skalierungsmodellen angepasst: Durch den Einsatz von Siliziumnitrid-Wälzkörpern ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ändert sich ein wichtiger Zusammenhang: Die reduzierte Dichte  $3200 \text{ kg/m}^3$  anstelle  $7850 \text{ kg/m}^3$  für 100Cr6-Stahl,  $\varphi_\rho \approx 0,408$  – hat Einfluss auf die Zentrifugalkräfte  $F_{Zf}$ , die einen nennenswerten Anteil an der Wälzkörperbelastung haben, vgl. Abbildung 8.8:

$$\varphi_{F,Zf} = \varphi_L^3 \cdot \varphi_\omega^2 \cdot \varphi_\rho \quad (8.4)$$

Die Dichte ist zwar die Eigenschaft, auf deren Änderung die Zentrifugalkraft am wenigsten sensitiv reagiert. Die Drehzahl wird nach (8.3) sogar um 1,8 % verringert. Durch die Veränderung dieser Materialeigenschaft kann die Beanspruchung des Wälzkörpers durch Fliehkräfte jedoch um 24,6 % reduziert werden. Dadurch werden Beanspruchungsreserven für höhere Zahnkräfte gebildet.

Dieses Ergebnis ist in Abbildung 8.7 dargestellt. Dort ist ebenfalls die Analyse der Skalierungsgrenze bei der Drehzahlerhöhung dargestellt, Kriterium ist eine gleiche Flächenpressung im

Wälzkontakt bei geometrisch ähnlichem Wälzkontakt. Die absolute Beanspruchung des Wälzkörpers nimmt um 9,7 % ab, hierbei sind neben den Zentrifugal- auch Vorspann- und Unwuchtkräfte berücksichtigt. Diese Senkung der Beanspruchung kann, aufgrund der identifizierten Wechselwirkung mit den Verlusten stromabwärts (Gleitlager, Dämpfungslager, Radial-Wellendichtring) zur Kompensation ggf. steigender Verluste dort dienen.

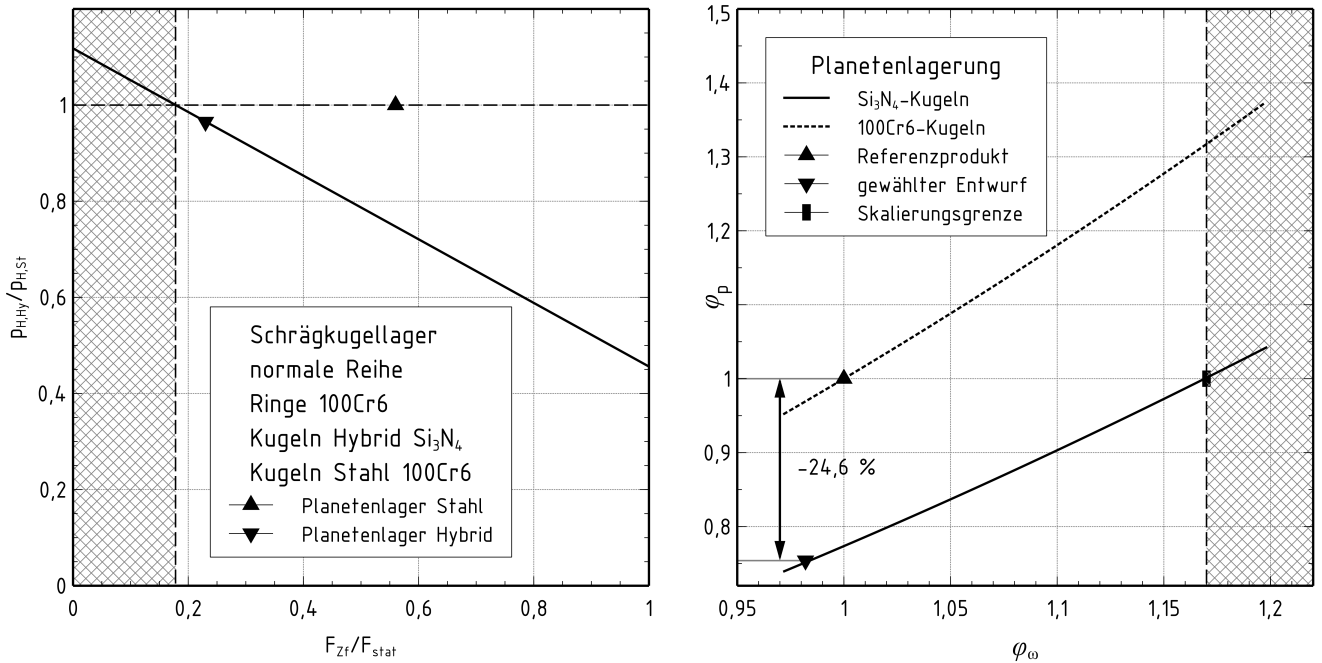


Abbildung 8.7: Auswirkung eines Wechsels des Lagerwerkstoffs. Links: Die Anpassung von Eigenschaften ist u.U. von Randbedingungen abhängig, hier von einer minimalen relativen Zentrifugalkraftbelastung. Rechts: Durch die Anpassung der Dichte ändert sich die Relation zwischen Drehzahl und Gesamtbeanspruchung; Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Wälzkörper sind durch die geringere Sensitivität weniger anfällig gegenüber Unsicherheit der Drehzahl und bieten einen breiten möglichen Skalierungsbereich (Ordnungskriterium ist ebenfalls die Drehzahl).

Ferner geht die als unabhängige Eigenschaft in (8.4) variable Baugröße ebenfalls in die Beanspruchung ein. Soll die Pressung konstant gehalten werden, folgt mit  $p = F/A$ <sup>382</sup>, also auch  $\varphi_p = \varphi_F \varphi_L^{-2}$  bei gleicher Winkelgeschwindigkeit und gleicher Dichte und nach Einsetzen von (8.4)

$$\varphi_p = \varphi_{F,Zf} \cdot \varphi_L^{-2} = \varphi_L^3 \cdot \varphi_L^{-2} = \varphi_L. \quad (8.5)$$

Damit sind die Verringerung der Dichte und die Verringerung der Lagergröße hinsichtlich der Beanspruchung durch Zentrifugalkräfte gleichwertige Skalierungsalternativen. Wird jedoch in Betracht gezogen, dass auch Relationen zu nicht von der Wälzkörpergeometrie abhängigen Belastungen bestehen – dies sind sowohl Vorspannkkräfte der angestellten Lagerung, die unabhängig von der Drehzahländerung sind, als auch die Zahnkräfte des Planetenrads, die über die Lager abgesetzt werden – wirkt sich hier eine Verkleinerung der Wälzkörper negativ aus. Die Pressung würde steigen, da bei kleinerer Kontaktfläche gleiche oder mit der Drehzahl wachsende Kräfte auf den Wälzkörper wirken.

<sup>382</sup> Geometrische Ähnlichkeit und gleiche Materialkombination vorausgesetzt gilt dies auch für HERTZ'sche Pressung; relevant ist, dass die Schmiegun zwischen Kugel und Lauffläche konstant bleibt.



Die Reduktion der Dichte des Wälzkörpers ist bei der Skalierung nahezu ohne ungewollte Nebeneffekte als die auf Basis der Relationen der Skalierungsmodelle (8.4) und (8.5) bevorzugt zu beeinflussende Eigenschaft identifiziert.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass durch die höhere Steifigkeit der  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Wälzkörper durch die geringere Abplattung der Kugeln die Kontaktfläche im Wälzkontakt verringert wird, die Pressung also steigt. Für Kugellager gängiger Proportionen steigt gegenüber Stahl-Wälzkörpern die Pressung um etwa über 12 %.<sup>383</sup> Die Zentrifugalkräfte müssen also in Abhängigkeit der genauen Kontaktgeometrie einen Mindestanteil an der resultierenden Belastung der Wälzkörper aufweisen, um eine tatsächlichen Reduktion der Beanspruchung durch den Werkstoffwechsel zu erreichen.

Die relative Zusammensetzung der Lagerbelastung ergibt sich für den skalierten Entwurf entsprechend Abbildung 8.8. Die Verringerung der Beanspruchung bedeutet eine Erhöhung der Drehzahlreserven und damit eine erhöhte tatsächliche Sicherheit – dies ist eine Möglichkeit, Unsicherheit zu beherrschen.

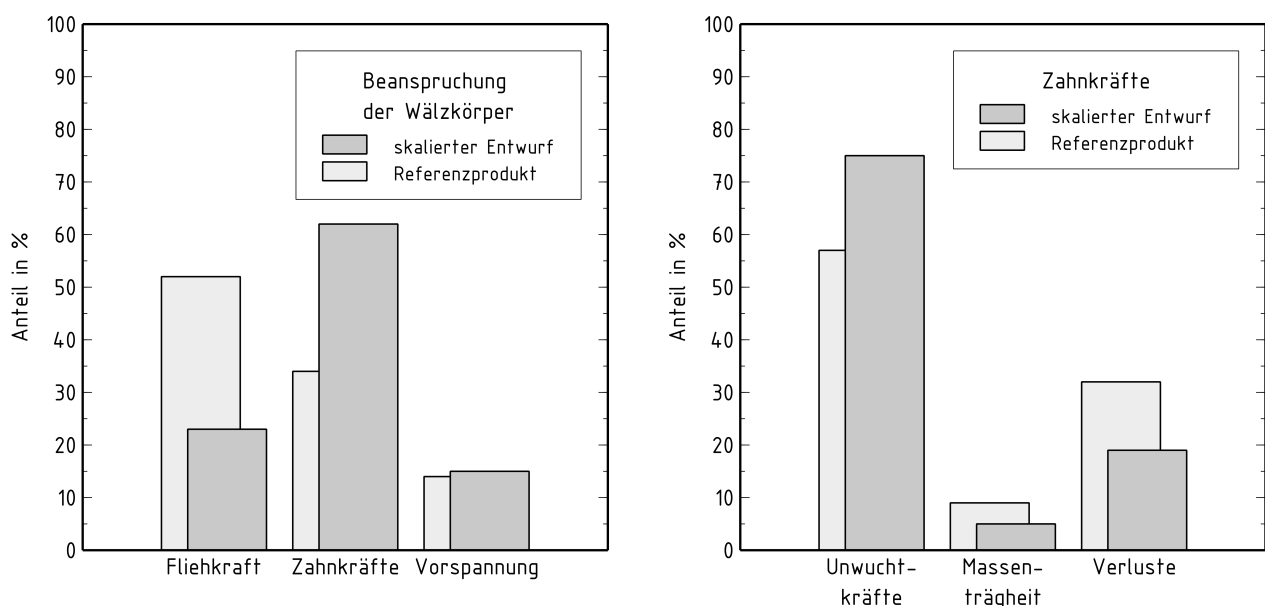


Abbildung 8.8: Veränderung der Beiträge einzelner Effekte zur Beanspruchung der Planetenradlagerung (links) und der Verzahnung (rechts).

Die Fliehkkräfte können durch eine Variation der Lagerung weiter gesenkt werden, da im Referenzprodukt ein drehender Außenring realisiert ist, welcher zu einer erhöhten Käfigdrehzahl des Lagers führt. Eine geometrische Umkehr verringert diesen Einfluss und kann bei symmetrischer Gestaltung sogar die aus den Zahnkräften resultierenden Belastungen senken. Es stellt sich dann ein kürzerer Hebelarm der Kraft zum höher belasteten Lager und ein längerer Hebelarm zum niedriger belasteten Lager ein. Dadurch wird die Belastung der Lager angeglichen, was ebenfalls dem Prinzip gleicher Ausnutzung der Bauteile beim skalierungskritischen Entwurf entspricht. Die Anpassung der Konstruktion ist in Abbildung 8.9 dargestellt.

Am Beispiel der Planetenräder und ihrer Lagerung kann gezeigt werden, dass eine Analyse der Relationen zwischen Skalierungsgesetzen und über die separat skalierten Gestaltungszonen hinweg bei der Festlegung der Gestalteigenschaften hilft. Außerdem können im Rahmen der Synthese der Wirkstruktur Lösungsvarianten mit unterschiedlicher Anordnung der Lager zu einer besser

<sup>383</sup> Berechnet auf Grundlage von KIRCHNER 2007, S. 655 ff. Stoffwerte aus HWG 2017, S. 37.



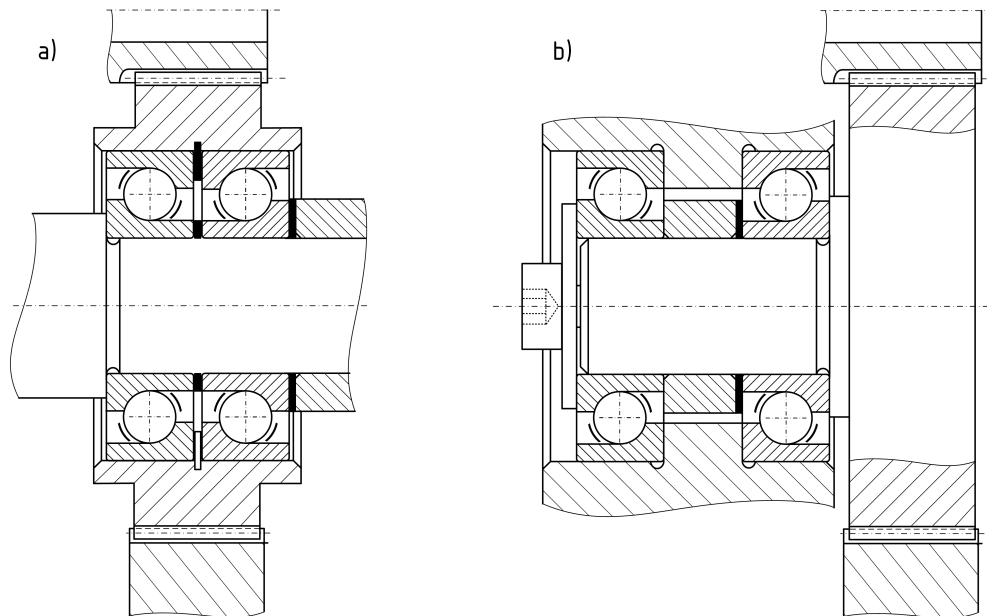


Abbildung 8.9: a) Planetenlagerung im Referenzprodukt. b) Planetenlagerung zur Erweiterung des Drehzahl-Skalierungsspektrums. Eine weitere Verbesserung der Skalierbarkeit kann durch eine symmetrische Anordnung mit drehendem Innenring realisiert werden – dies führt jedoch zu Konflikten mit der Forderung nach einer möglichst geringen Anzahl anzupassender Bauteile. Planetenträger und Getriebegehäuse müssten umgestaltet werden.

skalierbaren Gesamtlösung führen (drehender Innenring und symmetrische Anordnung). Insbesondere die Analyse der Skalierungsgrenzen verschiedener Lageranordnungen in der Konzeptphase der Entwicklung des Referenzprodukts hätte mit einer symmetrischen Anordnung mit drehendem Innenring eine erheblich höhere Drehzahlgrenze zur Folge gehabt. Zur Lageranordnung siehe Abbildung 8.10.

Dies ist ein starkes Indiz für die Wirksamkeit der Betrachtung der Skalierungsgrenzen der konkreten Teillösungsvarianten bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Dadurch kann nachgewiesen werden, dass die Berücksichtigung der Skalierbarkeit einer physikalischen Größe in den PEP-Phasen des Entwurfs und des Konzipierens einen Nutzen gegenüber der kBRE realisieren kann. *Das Ergebnis ist eine Bestätigung für das Frontloading betonende Vorgehen in der nBRE.*

Die nachträgliche Korrektur der konzeptuellen Schwäche des im Referenzprodukts gewählten Anordnung mit drehendem Außenring, den auch der Experte als Entwickler bei der Entwicklung eines drehzahlskalierten Getriebes nach kBRE als skalierungskritisches Element erkannt hat, vgl. S. 155, verursacht einen sehr hohen korrektiven Aufwand, der durch das Vorgehen der nBRE mit frühzeitiger Analyse des maßstabsabhängigen Verhaltens zu vermeiden gewesen wäre.

### Gleitlager und Dämpfungslager

Insbesondere das kombinierte hydrodynamische Axial-Radial-Gleitlager konnte als die den Skalierungserfolg zentral bestimmende Komponente identifiziert werden, vgl. Unterabschnitt 8.1.4. Das Gleitlager ist für einen erheblichen Teil der Verluste des Getriebes verantwortlich. Aufgrund seiner Lage weit stromabwärts hängt die Belastung aller Bauteile stromaufwärts stark vom Reibmoment des Gleitlagers ab. An das Gleitlager werden Anforderungen hinsichtlich der Stabilität (Radial-Gleitlager) und der Tragfähigkeit (Axial-Gleitlager) gestellt. Ferner stellt sich im Rahmen

der Analyse heraus, dass beide Teile des Gleitlagers im vollturbulenten Bereich betrieben werden. Durch einen Versuch – Messung der Verlustleistung des Grundentwurfs bei verschiedenen Drehzahlen – konnte gezeigt werden, dass beide Teile des Gleitlagers vollturbulent laufen, außerdem wurde das vermutete Wachstumsgesetz für die Verlustleistung im turbulenten Bereich bestätigt –  $\varphi_{P,V,tur,Ra} = \varphi_{\omega}^3$ . Damit steigt die Verlustleistung überproportional zu den mechanischen Verlusten im Getriebe, vgl. (3.6). Für das Axial-Gleitlager konnte ein Anteil an den Verlusten beider Gleitlager von etwa 30 % bei 200.000 1/min festgestellt werden, hier ergibt sich ein Wachstumsgesetz<sup>384</sup> von  $\varphi_{P,V,tur,Ax} = \varphi_{\omega}^{2,2}$ .

Durch die Reduktion der Abmessungen des Gleitlagers, wobei hier beim Axialgleitlager mehr Potenzial zu heben war, konnte der Anstieg Verlustleistung des Radial-Gleitlagers auf  $\varphi_{V,tur,Ra,1} = 1,67$  begrenzt werden, für das Axial-Gleitlager ergibt sich nach der konstruktiven Anpassung  $\varphi_{V,tur,Ax,1} = 0,32$ . Relevant für die Beanspruchung der Gestaltungszonen Stromaufwärts sind die Zahnkräfte, durch die Verkleinerung des Teilkreises des Sonnenrads und die Erhöhung der Drehzahl folgen sie zu

$$\varphi_{F,Z} = \varphi_{P,V,ges} \cdot \varphi_{\omega}^{-1} \cdot \varphi_D^{-1}, \quad (8.6)$$

wodurch sich die Zahnkraft als Gestaltungszonen übergreifend wichtige Eigenschaft zu

$$\varphi_{F,Z} = (\varphi_{P,V,tur,Ra,1} \cdot 0,7 + \varphi_{P,V,tur,Ax,1} \cdot 0,3) \cdot \varphi_{\omega}^{-1} \cdot \varphi_D^{-1} \quad (8.7)$$

ergibt. Der Stufensprung der Zahnkraft nimmt den Wert 1,27 an, die Zahnkräfte erhöhen sich durch die Anpassung des Gleitlagers also nur unwesentlich. Mit dieser Information können die Gestaltungszonen stromaufwärts ausgelegt werden.

Durch die Versuche zur Reduktion der Modellunsicherheit hinsichtlich der Verlustleistung konnte ein durch den Versuch bestätigtes Skalierungsmodell für die Lagerverluste des Gleitlagers gefunden werden. Die Modellierung der Relationen zwischen den Eigenschaften verschiedener Gestaltungszonen erlaubte nicht nur das Erkennen der Relevanz des Gleitlagers für die Skalierung, sondern auch die Nutzung der Ergebnisse der Gleitlagerskalierung zur zielgerichteten und effizienten Anpassung der übrigen Gestaltungszonen.

### Sonnenrad und Schleuderwelle

Neben der im Abschnitt zur Verzahnung und Übersetzung auf S. 148 angesprochenen Reduktion des Teilkreisdurchmessers der Verzahnung des Sonnenrades wird der Durchmesser im Bereich des Axial- und des Radialgleitlagers angepasst, vgl. Abschnitt „Gleitlager und Dämpfungslager auf S. 152. Der kritische Querschnitt bleibt unverändert, während die Formzahl  $\alpha$  durch die Reduktion des größten Durchmessers des Sonnenrades (Bord für das Axial-Gleitlager) sogar reduziert wird. Die mechanische Beanspruchung wird unterhalb des Axial-Radial-Gleitlagers bleibt gleich, da aufgrund der höheren Zieldrehzahl bei dem Wunsch die Zykluszeit nicht nach oben anpassen zu müssen das Produkt aus Winkelbeschleunigung und Trägheit gleich bleibt:

$$\varphi_{M,ab} = \varphi_{\Theta,R} \cdot \varphi_{\dot{\omega}} = 1 \quad (8.8)$$

Damit bleibt die Beanspruchung der Schleuderwelle gleich, ihre Maße werden ebenso wie die Welle-Nabe-Verbindung der Schleuderwelle mit dem Sonnenrad nicht verändert.

<sup>384</sup> Abgeleitet aus (WILCOCK und BOOSER 1957, S. 343.)

---

Bereits umgesetzt ist ein Prinzip des Robust Design für die Baureihenentwicklung, vgl. Abschnitt 7.4, das gleichzeitig bei einer Skalierung die Auswirkung von Einflüssen wie einem nichtproportionalen Wachstum der Wuchtgüte des Rotors oder Fertigungstoleranzen reduziert, beides vgl. (3.11): Die Abtriebswelle ist sehr schlank und damit biegeweich ausgeführt, der Rotor läuft im Prüffall immer überkritisch. Damit läuft er als dominante Masse um seinen Schwerpunkt um, das Sonnenrad wird kaum durch Unwuchtkräfte des Rotors belastet.

Durch die Selbstzentrierung wirkt sich die relative Wuchtgüte, die bei kleinen Rotoren schlechter wird, unterproportional auf die Unwuchtkräfte des Sonnenrades aus.

Auch unterschiedlich gut gewuchtete Rotoren als Varianz einer Eigenschaft des Operanden, vgl. Abschnitt 6.3, rufen nur eine schwach ausgeprägte Nebengröße „Unwuchtkraft“ zwischen Prozess und Operator (HDG) hervor.

Weiterhin werden durch die weiche Lagerung des Sonnenrades im einem Axial-Radial-Gleitlager Zwangskräfte vermieden, das Sonnenrad zentriert sich zwischen den Planeten selbst, die Kraftaufteilung auf die Planeten erfolgt gleichmäßig. Fertigungstoleranzen verlieren auch hier an Einfluss.

Beide Lösungen können als Beispiel für die Verringerung der Auswirkung größenabhängiger Varianz angesehen werden.

### Radial-Wellendichtring

Die Verluste des Radial-Wellendichtrings (RWDR) treten gegenüber den Verlusten insbesondere des Axial-Radial-Gleitlagers und des Dämpfungslagers sowie der Lagerverluste (aufgrund der großen Anzahl an Lagern) zurück. Sie wachsen jedoch proportional zur Umfangsgeschwindigkeit und dem Durchmesser des RWDR. Auf eine Anpassung des RWDR kann verzichtet werden, da auch bei 350.000 U/min eine Umfangsgeschwindigkeit von 73,31 m/s nicht überschritten wird, was gemäß Herstellerangaben bei geeigneter Materialwahl und guter Schmierung und Kühlung – die Ölzufuhr kann de facto beliebig geregelt werden – unproblematisch ist. Konstruktive Anpassungen können damit vermieden werden.

---

#### 8.1.7 Referenz: Entwurf eines Experten

---

Die Referenz für ein auf 350.000 U/min skaliertes Getriebe, mit dem die in den vorigen Abschnitten angesprochenen Lösungen zur Skalierung verglichen werden sollen, wurde vom Entwickler des Referenzproduktes auf konzeptueller Ebene erarbeitet.<sup>385</sup> Der Entwurf wurde durch eine Skalierung des Referenzgetriebes, vgl. Abbildung 8.3, und anschließende korrigierende Anpassung kritischer Gestaltungszonen erarbeitet. Abbildung 8.10 zeigt das nach kBRE skalierte Getriebe.

Grundlage der Skalierung ist, entsprechend klassischer Skalierungsmethoden, eine Verkleinerung wesentlicher Bauteile, u.A. des Sonnenrades und der Abtriebswelle auf  $\varphi_D = 0,75$ . Damit kann ohne Beanspruchungserhöhung eine Steigerung der Winkelgeschwindigkeit auf  $\varphi_\omega = 4/3$  erreicht werden, was annähernd der notwendigen Drehzahlerhöhung entspricht. Es müssen jedoch auch die Stromaufwärts liegenden Gestaltungszonen angepasst werden.

Neben der geometrischen Skalierung wurden diverse Anpassungen vorgenommen, die in Tabelle 2.4 aufgearbeitet sind.

Die für das Vergleichsprodukt abgeschätzten Eigenschaften entsprechen den Anforderungen. Der zentrale Unterschied ist der Anteil der Bauteile, die im Zuge der Skalierung abweichend von geometrischer Ähnlichkeit angepasst wurden. Dieser liegt im Vergleichsprodukt höher.

---

<sup>385</sup> Vgl. THELEN 2016.

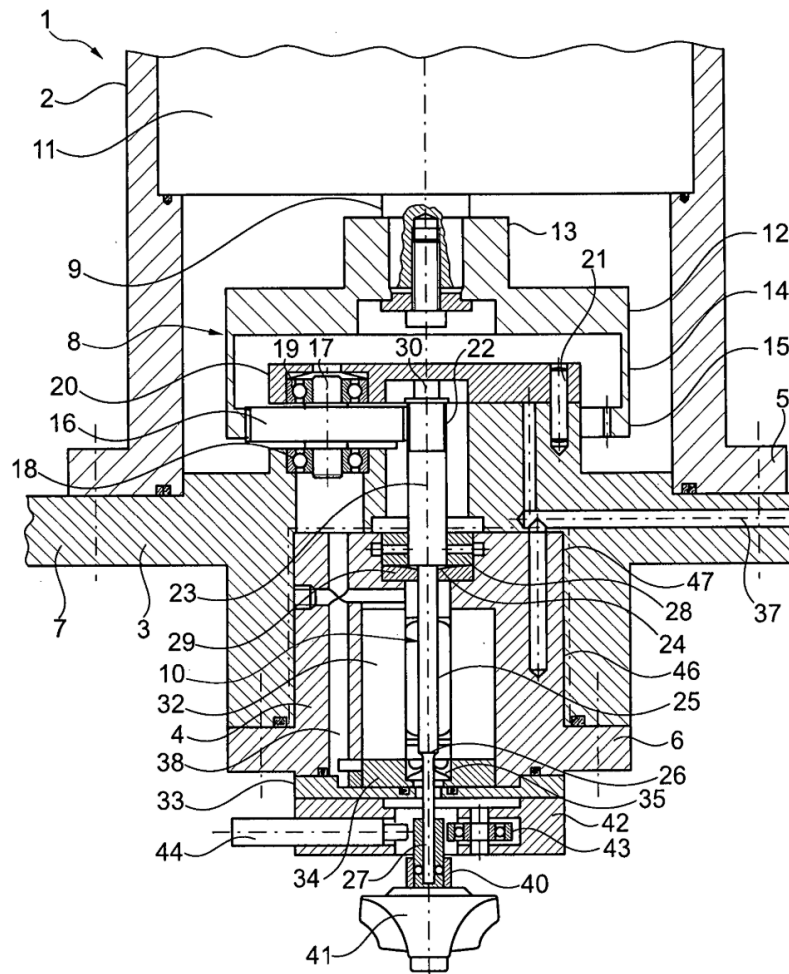


Abbildung 8.10: Vergleichskonzept zur Evaluation des skalierten HDG. Aus THELEN 2016.

Durch die geometrische Skalierung werden Restriktionen der Fertigung erreicht, eine Differentialbauweise bei Sonnenrad und Schleudrerwelle ist nicht mehr möglich. Durch den Wechsel auf ein Integralbauteil steigen die Kosten. Dies betrifft die aufwändigere Herstellung ebenso wie den Umstand, dass bei einem Versagen der Schleudrerwelle auch das Sonnenrad ausgetauscht werden muss. Die Montageprozesse müssen angepasst werden und werden anspruchsvoller. Ebenso muss aus Gründen der Montierbarkeit das Getriebegehäuse umkonstruiert werden.

Um die Beanspruchung der Planetenradlagerung zu ertragen, wurde eine symmetrische Lagerung mit drehendem Innenring verwendet, wie sie im Abschnitt „Planetenräder und Planetenlagerung“ auf S. 149 bereits vorgestellt wurde. Dies zieht eine Umkonstruktion des Planetenträgers nach sich.

Da der Zahneingriff bei verringertem Zahnmodul im Vergleichsgetriebe nicht verbreitert wurde, muss das Abtriebsmoment reduziert werden, um nicht die Tragfähigkeit der Verzahnung zu überschreiten, was zu längeren Zykluszeiten führt. Grund hierfür ist die mit der Drehzahl überproportionale Steigerung der Verluste im Gleitlager, die zu einer höheren relativen Zahnkraft auch bei der Verkleinerung des Getriebes führen.

### Vergleich der Lösungen

Hinsichtlich der Skalierungsmodellunsicherheit wurden im Rahmen der Entwicklung auf Basis der nBRE detailliertere Modelle des Getriebes insbesondere im Bereich der mechanischen und

---

hydrodynamischen Verluste verwendet. Auch die Skalierungsmodelle der nBRE für die Lagerungen sind von vornherein auf eine halbähnliche Skalierung der Gestaltungszonen abgestimmt, was zu einer SiM führt, die dem Entwickler eine gleichmäßigere Ausnutzung der Gestaltungszonen hinsichtlich ihres Skalierungspotenzials erlaubt und die Skalierungsmodellunsicherheit reduziert.

Die Skalierungsmodelle der kBRE setzen an dieser Stelle einen großen Erfahrungsschatz des Entwicklers voraus, der bei einem Experten, welcher ein für ihn nicht völlig neues Produkt entwickelt, vorhanden ist, aber bei Neukonstruktionen und wenig erfahrenen Entwicklern nicht existiert. Die Unterschiede zwischen den Entwürfen sind in Tabelle 8.1 verglichen.

---

## 8.2 Kritische Würdigung

---

Die Evaluation der Ergebnisse erfolgt zweischrittig: Auf qualitative Betrachtungen des Nutzens der Methodik folgt der Versuch der Quantifizierung des Nutzens. Die Grundlage der Evaluation ist der Vergleich der im vorausgegangenen Unterabschnitt 8.1.6 dargestellten Ergebnisse des Skalierungsprojekts mit dem konventionell skalierten Entwurf des HDG.

Ein großer Teil der Skalierung fand auf Ebene der Gestalt in der PEP-Phase des Entwurfs statt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits ein Grundentwurf vorliegt, der möglichst wenige Änderungen erfahren soll - nichts desto trotz wurden auch physikalische Effekte variiert und diese Variationen berücksichtigt, bspw. Magnetlager als Axiallager des Sonnenrads und der Schleuderröhre. Zentral für die Bestimmung der Skalierungsgrenzen und ein zielgerichtetes Anpassen dieses Entwurfs war der Umgang mit hoher epistemischer Unsicherheit, welcher in der konventionellen Baureihenentwicklung nicht systematisch aufgearbeitet ist. Ebenfalls ist die Randbedingung minimierter geometrischer Anpassungen eine der klassischen BRE entgegenlaufender Gedanke, da hier die vollständige Ähnlichkeit bereits zu Beginn des Skalierungsprozesses aufgegeben wird. Diese Entscheidung reduziert zwar den Nutzen der Modelltheorie für die Entwicklung, setzt aber das Potenzial einer aufeinander abgestimmten Baukasten-Baureihen-Produktfamilie frei.

---

### 8.2.1 Qualitative Beurteilung des Nutzens der Methodik

---

Aus der separaten Konzipierung des Getriebes durch einen sehr erfahrenen Experten und durch nicht mit dem Getriebe vertraute Methodiker ohne spezielle Kenntnisse im Getriebebau kann nicht abgeschätzt werden, welche Verbesserung die Methodik erzielt, also welches Potenzial (unter einem zu definierenden Gesichtspunkt) sich mit der Methodik realisieren lässt. Dies wäre nur möglich, wenn entweder dieselbe Person dasselbe Projekt einmal mit und einmal ohne Methodik bearbeitet, aber ohne es zuvor auf die andere Art und Weise bearbeitet zu haben – eine offensichtliche Verletzung des Kausalitätsprinzips. Oder wenn eine hinreichend große Stichprobe von Probanden das Problem löst, eine Gruppe mit, eine ohne Methodik. Der für statistisch abgesicherte Aussagen notwendige Aufwand ist im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht zu realisieren.

Es lässt sich jedoch anhand verschiedener Fragen beurteilen, ob die Methodik die grundsätzlichen Anforderungen an eine methodische Unterstützung erfüllt:<sup>386</sup>

- Ist das Vorgehen problemorientiert und allgemein anwendbar?
- Wird der Entwickler beim Erkenntnisgewinn unterstützt?
- Werden systematisch Lösungen erzeugt?

---

<sup>386</sup> Vgl. PAHL ET AL. 2007, S. 11. LINDEMANN 2009, S. 34. oder ANDREASEN und HEIN 1987, S. 184.

Tabelle 8.1: Änderungen am Grundentwurf bei Einsatz verschiedener Skalierungsmethodiken.

Gestaltungszone	Änderungen Experte Einsatz kBRE	Änderungen Projektteam Einsatz nBRE
<b>Riemen-trieb</b>	1. Nicht gestaltet, durch veränderte Spindel jedoch mind. geometrische Anpassungen der getriebenen Scheibe.	1. a) Erhöhung des Durchmessers ( $\varnothing$ ) der treibenden Riemenscheibe mit $\varphi_D = 1,096$ . 1. b) Alt. E-Maschine mit höherer Drehzahl.
<b>Spindel und Spindellagerung</b>	2. Gestaltung der Spindelwelle, 3. zusätzliche Verbindungselemente, 4. Neu gestaltete Spindellagerung.	2. Wechsel des Wälzkörperwerkstoffs der Spindellagerung (Stahl $\rightarrow$ $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).
<b>Hohlrad</b>	5. Vereinfachtes Bauteil, da nicht mehr Bestandteil der Spindelwelle, 6. angepasster Modul der Verzahnung $\varphi_m = 2/3$ .	3. Angepasster Modul der Verzahnung $\varphi_m = 2/3$ , 4. Verzahnung verbreitert auf $\varphi_{b,HR} = 1,50$ .
<b>Planetenräder und -lagerung</b>	7. Anpassung des Teilkreis- $\varnothing$ der Planeten auf $\sim \varphi_{D,P} = 1,2$ , 8. verkleinern des Zahnmoduls auf $\varphi_m = 2/3$ , 9. symmetrische Lagerung mit drehendem Innenring.	5. Anpassung des Teilkreis- $\varnothing$ der Planeten auf etwa $\varphi_{D,P} = 1,12$ , 6. Verkleinern des Zahnmoduls auf $\varphi_m = 2/3$ , 7. Anpassung der Zahnbreite auf $\varphi_{b,P} = 1,50$ , 8. asymmetrische Lagerung mit drehendem Innenring.
<b>Sonnenrad und Schleuderwelle</b>	10. Integralbauweise, 11. - $\varnothing$ der Schleuderwelle reduziert auf $\varphi_D = 3/4$ , Modul des Sonnenrads verringert auf $\varphi_m = 2/3$ .	9. Reduktion des Teilkreis- $\varnothing$ des Sonnenrads auf $\varphi_D = 0,88$ , 10. Modul des Sonnenrads verringert auf $\varphi_m = 2/3$ , 11. Breite der Verzahnung erhöht auf $\varphi_{b,SR} = 1,50$ .
<b>Gleitlager</b>	12. Geometrische Anpassungen am Gleitlager.	12. Reduktion des mittleren $\varnothing$ des Axiallagers auf $\varphi_{d,m,Ax} = 0,62$ , 13. Verringern von $\varnothing$ und Breite des Radiallagers um $\varphi_{d,Ra} = \varphi_{b,Ra} = 0,90$ , 14. Vermindern des mittleren Lagerspiels auf $\varphi_{s,Ra} = 0,96$ .
<b>RWDR</b>	13. $\varnothing$ reduziert auf $\varphi_D = 3/4$ .	Ggf. Erhöhung des Ölmassenstroms für Kühlung und Schmierung.
<b>Gehäuse und Dämpfungslager</b>	Weitreichende Anpassungen an 14. Gehäuse, 15. Planetenträger, und 16. Dämpfungslagergehäuse.	15. Anpassung des Planetenträgers.



- Erleichtert das Vorgehen die Planung und Steuerung der Arbeit im Entwicklungsprozess?

Wenn diese Fragen positiv beantwortet werden können, wird es auch dem Nicht-Experten möglich sein, mit der Methodik auf effizientem Wege eine solide Lösung zu erzeugen. Die Beantwortung der Fragen erfolgt in Rückgriff auf die erarbeiteten Inhalte sowie das Beispielprodukt aus dem vorigen Kapitel.

### Problemorientierung der nBRE

Die *Problemorientierung* des Vorgehens der nBRE ist durch den Abgleich des Vorgehens mit den in Kapitel 4.1 herausgearbeiteten Schwächen konventioneller Baureihenentwicklung zu verdeutlichen: Rationalisierungsbestrebungen der kBRE werden durch die mangelnde Antizipation von Ist-Eigenschaften skalierte Entwürfe ausgebremst. Die nBRE setzt auf allen Ebenen ab der Wahl physikalischer Effekte dazu an, durch Analysemethoden zu jedem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses abgesicherte Skalierungsmodelle zu erstellen, mit denen eine Früherkennung von Ist-Eigenschaften angestrebt wird. Am Beispiel des HDG zeigt sich das an den gesetzten Schwerpunkten der Analyse und der Verwendung der Analyseergebnisse. Durch eine frühe Analyse der Getriebeverluste als dominierender Energiesenke und damit dominierendem Verursacher von Beanspruchung innerhalb der Komponenten fiel das Axial-Radial-Gleitlager mit einem besonders großen Anteil an den Gesamtverlusten auf, vgl. Abschnitte 8.1.4 und 8.1.5. Dies zusammen mit den aus der gezielten Analyse und dem Mapping von Randbedingungen (nicht weiter verbesserbare Wuchtgüte des Sonnenrades) führte zur direkten Identifikation des Gleitlagers als skalierungskritischer Gestaltungszone. Die Verluste wurden mit Skalierungsmodellen für den skalierten Zustand abgeschätzt, das gegenüber anderen Effekten wie den Unwuchtkräften überproportionale Wachstum der Gleitlagerverluste bestätigte die Relevanz dieser Gestaltungszone für den Skalierungsprozess.

Dieses Vorgehen aus der Analyse des Systems und der Prognose der skalierten Ist-Eigenschaften erlaubte eine darauf aufbauende zielgerichtete Synthese von Lösungen (Verringerung der Verluste in der Sonnenradlagerung). Aufgrund der Verwendung von außerhalb der Baureihenentwicklung bereits evaluierten allgemein anwendbaren Methoden und Modellen<sup>387</sup> ist auch die Übertragbarkeit des Vorgehens auf andere Fragestellungen des Maschinenbaus gegeben. Die erste Frage kann also uneingeschränkt mit „Ja“ beantwortet werden.

### Erkenntnisgewinn mit Hilfe der nBRE

Der *Erkenntnisgewinn* des Entwicklers wird durch das explizite Anhalten zur Systemanalyse und zum Verknüpfen von Informationen unterstützt. Das Vorgehen wurde auf alle Gestaltungszone angewandt. Durch die Zerlegung des Systems in Subsysteme, separate Identifikation skalierungskritischer Eigenschaften und Synthese skalierte Teillösungen, die dann auf Kompatibilität untereinander und hinsichtlich der Auswirkung von Änderungen im System überprüft wurden, konnte die große Komplexität beherrscht werden. Das Gesamtsystemverhalten des Ausgangsproduktes konnte in Übereinstimmung mit später durchgeführten Versuchen modelliert und für das skalierte Getriebe plausibel abgeschätzt werden. Dies ist die zentrale für ein Skalierungsproblem anzustrebende Erkenntnis – lässt sich das Skalierungsziel erreichen, und welches Verhalten legt das Produkt in diesem Maßstab an den Tag? Nicht zuletzt die Aussage des Projektpartners, im Rahmen der Zusammenarbeit ein deutlich vertieftes Verständnis hinsichtlich der Abhängigkeiten von Effekten

<sup>387</sup> Im Rahmen der Arbeit wurden u.A. das MVM, das Robust Design, die UMEA, die Modellwissenschaft, das Arbeiten mit DSM/DMM/MDM, die Eigenschaftstheorie, aber auch Vorgehensmodelle wie die VDI 2221, der CPM/PDD-Ansatz und das Axiomatic Design aufgegriffen.



---

und Gestaltungszonen untereinander im Hochdrehzahlgetriebe erworben zu haben spricht ebenfalls für den erreichten Erkenntnisgewinn durch die Nutzung der nBRE und ihrer zugeordneten Modelle.

### Systematisches Erzeugen von Lösungen durch die nBRE

Das *systematische Erzeugen von Lösungen* wurde durch die Identifikation der skalierungskritischen Eigenschaften unterstützt. Am Beispiel des Gleitlagers führte die identifizierte Stellschraube der Lagerverluste dazu, dass neben geometrisch skalierten Varianten auch solche erzeugt wurden, in denen Axial- und Radiallager separat voneinander angepasst wurden, um sie besser auf den im neuen Nutzungsprozess abweichenden Operanden (kleinere Turboladerrotoren) abzustimmen und Überdimensionierung zu vermeiden. Die Skalierung von Eigenschaften von Betriebsstoffen (Öl) wurde ebenfalls in Betracht gezogen, konnte aber durch das generieren von Skalierungsmodellen als unwirksam identifiziert werden – genauso wie der Einsatz verschiedener Wälzlagervarianten. Auch die Variation physikalischer Effekte durch die Verwendung von Magnetlagern oder Magnetlager-Gleitlager-Hybridlösungen wurde in Betracht gezogen. Alle im Rahmen einer systematischen Kombination von Teillösungen erzeugten Stellvertreterlösungen erfüllen – abgeleitet aus den prognostizierten skalierten Ist-Eigenschaften – die Anforderungen an Drehzahlfestigkeit und unveränderte Beanspruchung in Bereichen hoher Modellunsicherheit. Damit sind die Lösungen hinsichtlich der Skalierung als systematisch auf die Erfordernisse abgestimmt anzusehen.

### Planung und Steuerung des PEP durch die nBRE

*Planung und Steuerung* der Arbeit im Entwicklungsprozess wurden durch die Anlehnung an etablierte Vorgehensmodelle ebenfalls sichergestellt. Die intensive Analyse des Problems und umfangreiche Modellbildung in den ersten Projektphasen hat die Vorteile des Frontloadings in der Baureihenentwicklung realisieren können, vgl. Abschnitt 5.3. Die Synthese von Lösungen hat infolge der umfangreichen Analyse im Vorfeld einen vergleichsweise geringen Zeitaufwand verursacht, wichtige auf Skalierungsmethoden basierende und durch die auf die SMU-UMEA verbesserte Analyseergebnisse konnten nach dem Projekt durch Versuche bestätigt werden.

Aus qualitativer Sicht kann daher die Erfüllung der Anforderungen an ein methodisches Vorgehen festgestellt werden. Plausible Lösungen für ein neues Problem, welches die Möglichkeiten konventioneller Methoden bereichsweise übersteigt, vgl. Unterabschnitt 8.1.2, konnten zielgerichtet und zügig erarbeitet werden.

---

## 8.2.2 Quantifizierte Beurteilung des Nutzens der Methodik mittels eines KPI

---

Zur Evaluation des Nutzens der nBRE und ihrer zugeordneten Subvorgehensmodelle und Produkt- und Skalierungsmodelle soll ein *Key Performance Indicator (KPI)* definiert und ausgewertet werden.

Ein KPI soll nach PARMENTER für die Organisation, in welcher er genutzt wird, eine Schlüsselkenngröße sein. Das bedeutet absolut zentrale Geschäftsprozesse bewertbar zu machen und dabei zu helfen, die Leistung zu verbessern.<sup>388</sup> In Hinblick auf die Nutzung einer neuen Methodik kann eine Indikatorveränderung nach Anpassungen indirekt Hinweise über die Nützlichkeit der Methodik geben, nämlich dann, wenn sie hinreichend genau von anderen Effekten zu trennen sind. Solche Effekte sind bspw. Lerneffekte, Veränderungen der Teamzusammensetzung und -zusammenarbeit etc., aber auch andere, oft zeitgleich implementierte Maßnahmen wie von der Methodik unabhängige Änderungen in Geschäftsprozessen.

---

<sup>388</sup> Vgl. PARMENTER 2015, S. 27.

Betrachtet man KPIs im Licht der Modellwissenschaft, wird schnell klar, warum ihre Aussagekraft bezüglich eines Methodeneinsatzes begrenzt ist:

Die von den KPI repräsentierten Zusammenhänge weisen eine umfangreiche Relevanzliste auf, da sie von einer großen Zahl an Einflüssen abhängen. Leitet man nun ein System aus  $\Pi$ -Kennzahlen ab, folgt für einen dimensionslosen KPI:

$$\Pi_{\text{KPI}} = \Pi_1^n \cdot \dots \cdot \Pi_i^m \quad (8.9)$$

Entsprechend des  $\Pi$ -Theorems von BUCKINGHAM existieren nun nach (2.11) unendlich viele Systeme, die den durch  $\Pi_{\text{KPI}}$  gegebenen Punkt im  $\Pi$ -Raum realisieren. Diese Realisierungen können durch sich gegenseitig im  $\Pi$ -Raum kompensierende Einflüsse ineinander überführt werden. Das heißt: Unter einer unendlichen Zahl von Realisierungen werden, wie oben in Beispielen bereits angedeutet, unendlich viele aus Sicht eines Unternehmens hochwertige genauso wie unendlich viele geringwertige Realisierungen auftreten, die sich anhand des KPI jedoch nicht unterscheiden lassen. Unter modellwissenschaftlichen Gesichtspunkten ist der Einsatz eines einzelnen KPIs oder eines unvollständigen Satzes von KPIs ohne die Definition weiterer Kennzahlen also fragwürdig.

Besser geeignet – im Vergleich zweier begrenzter Systeme mit gleichem Zweck – sind Result Indicators (RI) bzw. Key Result Indicators (KRI), welche den Output eines Betrachteten Systems messen, klassischerweise die Teamleistung.<sup>389</sup> Dabei lösen sie jedoch meist wenig feingranular auf, es lässt sich also nicht sagen, welches Systemelement für das Resultat mehr, und welches weniger verantwortlich ist.<sup>390</sup>

Als geeignete RIs können aus den Anforderungen abgeleitete Bezugsgrößen aufgestellt werden. Eine sinnvolle Herangehensweise leitet sich von den aus dem Leichtbau bekannten Strukturkennwerten, beispielsweise der auf die Masse bezogenen Traglast, der Reißlänge oder der spezifischen Steifigkeit, ab.<sup>391</sup>

Um eine absolute Vergleichbarkeit zu erhalten, müssen absolute Bezugsgrößen aus den Fest- und Bereichsforderungen abgeleitet werden, die mit den weichen Zielen wie Zielforderungen und Wünschen verrechnet werden.

Aus den Anforderungen, vgl. S. 142, kann die fallspezifisch aufzustellende Zielfunktion, für das Skalierungsvorhaben beim HDG abgeleitet werden:

$$Z_{\text{HDG}} = a_E^{-1} \cdot \frac{n_{\text{max}}}{350.000 \text{ min}^{-1}} \cdot S_{\text{min}} \quad (8.10)$$

Die Gleichung ist folgendermaßen zu interpretieren: Die Anzahl der Änderungen  $a_E$  an Eigenschaften ist entsprechend der Anforderungen unerwünscht, sie verkleinert den Term. Da immer eine Eigenschaft skaliert wird, kann dieser Term höchstens den Wert 1 annehmen. Es folgt die auf die Soll-Drehzahl bezogene prognostizierte maximale Ist-Drehzahl, dieser Term stellt das Skalierungspotenzial der Lösung dar, vgl. Abbildung 8.5, kann jedoch für den Fall, dass eine Drehzahlerhöhung über den Zielwert hinaus keinen Nutzen bringt vernachlässigt werden oder durch einen Gewichtungsfaktor abgemindert werden. Alle geeigneten Lösungen erreichen hier einen Wert von 1 oder darüber.

Eine abschließende Multiplikation mit dem kleinsten auftretenden Sicherheitsfaktor ( $S = \sigma/R$ ) berücksichtigt die Reserven, die noch zur Kompensation von Modellunsicherheit vorhanden sind.

<sup>389</sup> Vgl. PARMENTER 2015, S. 27.

<sup>390</sup> Ebenda.

<sup>391</sup> Vgl. WIEDEMANN 2007, S. 462 f.

Der Sicherheitsfaktor ist definiert als Quotient der abgerufenen Drehzahl zur maximal in der Stufe möglichen Drehzahl in der am höchsten ausgenutzten Gestaltungszone.

Der RI kann nicht für die einzelnen Varianten – nBRE-skaliertes Getriebe, kBRE-skaliertes Getriebe und Grundentwurf – berechnet werden, da die Sicherheitsfaktoren nicht im Detail bekannt sind. Es können unter der Annahme konstant bleibender maximaler Beanspruchungen (in kBRE implementiert und im nBRE-Entwurf als Auslegungskriterium verwendet) aber Sicherheitsfaktoren relativ zum Grundentwurf angegeben werden. Die tatsächliche Sicherheit ist dann

$$S_{\text{real}} = S_{\text{min}} \cdot S_{\text{min},0} \quad (8.11)$$

In beiden Fällen muss  $S_{\text{min}} = 1$  angenommen werden: Für das HDG nach nBRE kann für den RWDR keine Aussage über sein tatsächliches Skalierungspotenzial getroffen werden, für den Expertenentwurf liegen aufgrund des geringeren Konkretisierungsstands nicht für alle Gestaltungszonene berechnete Sicherheitsfaktoren vor.

Die Werte, die der Berechnung von  $Z$  zugrunde liegen, sind in Tabelle 8.2 aufgeführt. Hierbei ist anzumerken, dass für die Anzahl der geänderten Eigenschaften, die schwer zu bestimmen ist, die Anzahl der Änderungen insgesamt eingesetzt wird; hierbei wird nicht berücksichtigt, dass die Änderungen, die im Rahmen des nBRE-Konzepts vorgenommen werden sollen, oft weniger aufwändig ausfallen als in der Lösung des Experten. Die Berechnung von  $Z_{\text{HDG}}$  wird daher deutlich zu Ungunsten der nBRE verschoben.

Tabelle 8.2: Daten zur Berechnung des RI zum Nutzen der nBRE.

<b>Faktor</b>	<b>HDG-Entwurf Experte mit Einsatz kBRE</b>	<b>HDG-Entwurf mit Einsatz der nBRE</b>
$a_E$ (Tabelle 8.1)	16	15
$n_{\text{max}}$	350.000 1/min	402.500 1/min
$S_{\text{min}}$	1	1

Damit ergeben sich  $Z_{\text{HDG,Experte}} = 0,0625$  und  $Z_{\text{HDG,nBRE}} = 0,07667$ . Im Rahmen der vorhandenen Informationen kann damit der durch die nBRE generierte Entwurf unter dem Vorbehalt des noch geringen Konkretisierungsgrades beider verglichener Konzepte als günstigere Lösung angesehen werden.

---

## 9 Fazit

---

Das Fazit fasst die Ergebnisse der Arbeit kritisch zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche künftige Forschungsvorhaben im Kontext der Baureihenentwicklung.

---

### 9.1 Ergebnisse

---

Entwicklungsmethodiken für Baureihen – zentral die Baureihenentwicklungsmethodik von PAHL & BEITZ – basieren meist auf der Modellwissenschaft und setzen einen vollständigen Grundentwurf bzw. ein Modell voraus. Auf dessen Basis werden die Folgeentwürfe generiert.

Dies führt dazu, dass unstetige Skalierungsgesetze, unvorhergesehene äußere Einflüsse oder mit anderen Wachstumsexponenten skalierende Varianz in Produkteigenschaften oder Zustandsgrößen zu einem vom Skalierungsziel abweichenden Verhalten der Folgeentwürfe führen. Dadurch werden Iterationsschleifen im Anschluss an die eigentliche Skalierung nötig, um die Folgeentwürfe entsprechend anzupassen. Diese halbähnlichen Anpassungen können aufgrund ihrer späten Stellung im Baureihenentwicklungsprozess zu großem Aufwand führen, weiterhin werden bei der isolierten Entwicklung eines Grundentwurfs u.U. Lösungen gewählt, die in skalierten Entwürfen nicht die günstigste Lösung darstellen. Diese Problematik konnte im Rahmen dieser Arbeit grundlegend beleuchtet und auf die in Prozessen entstehende Unsicherheit zurückgeführt werden, vgl. Kapitel 3.

Mit der Identifikation von Unsicherheit verschiedener Ursachen als wichtigstem Hindernis in der Nutzung der Modellwissenschaft zur Skalierung von technischen Systemen konnte eine Ursachen-Wirkungs-Beziehung für Skalierungsunsicherheit und Skalierungsmodellunsicherheit hergeleitet werden, vgl. die Abschnitte 3.1 und 3.2.

Neben der Unterscheidung von Skalierungsprozesse betreffender Unsicherheit in Skalierungsunsicherheit und Skalierungsmodellunsicherheit ist nun eine Differenzierung der Tätigkeiten der Skalierung unter Unsicherheit als Skalierungsprozess bei gleichzeitigem Informationsmangel und der Skalierung von Unsicherheit als die Unsicherheit beherrschende Tätigkeit im Entwicklungsprozess möglich, vgl. Abschnitte 3.3 und 3.4. Darauf aufbauend konnte ein detailliertes Modell von Skalierungsunsicherheit abgeleitet werden, vgl. 3.5.

Aus diesem neuen Konzept der Skalierungsunsicherheit konnten der Forschungsbedarf und die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet werden, vgl. Kapitel 4. Das wichtigste Ziel war die Entwicklung einer Methodik, welche eine Entwicklung von Baureihen in den Produktentwicklungsprozess integriert, und die nicht wie bisher als nachgelagerte Tätigkeit darstellt.

Durch die Integration der Skalierung in den Produktentwicklungsprozess, als nBRE bezeichnet, werden Potenziale des Frontloadings freigesetzt: skalierungskritische Eigenschaften und Relationen können früher als solche erkannt werden, wenn der Entwickler parallel zur Produktkonkretisierung das maßstabsabhängige Verhalten der Lösungen analysiert und bewertet, vgl. Abschnitt 4.3.

Die Früherkennung von kritischen Produktelementen vermeidet Fehler und sorgt so für einen schnelleren und kostengünstigeren Produktentwicklungsprozess.

Als Ergebnis wurde ein Entwicklungsprozess in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2221 modifiziert, um die Maßstabsabhängigkeit von Lösungen auf allen Konkretisierungsebenen des Produkts systematisch in den Entwicklungsprozess einzubinden, vgl. Kapitel 5.

Um die Analyse der Maßstabsabhängigkeit von Eigenschaften und Relationen zu verbessern, wurden Modelle der Baureihenentwicklung um die Beschreibung von Unsicherheit erweitert, vgl. Kapitel 6. Hierunter fällt auch ein erweitertes Modell zur Analyse technischer Prozesse, vgl. Abschnitt 6.3. Kritisch ist hier die hohe Komplexität durch große Mengen abzubildender Information,

---

die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht durch eine Rechnerunterstützung handhabbar gemacht werden konnte – dies hätte den Rahmen der Arbeit gesprengt.

Um dem Entwickler weitere Orientierung bei der Baureihenentwicklung zu geben und den Entwicklungsprozess zielgerichtet ablaufen zu lassen, wurden in Kapitel 7 ergänzende Vorgehensmodelle zu Problemlöseprozessen in der Baureihenentwicklung, zur Beherrschung von Skalierungs- und Skalierungsmodellunsicherheit sowie zur Unterstützung von konkreten Analyse- und Syntheseprozessen entwickelt.

Die anschließende Evaluation der nBRE wird am Beispiel eines Hochdrehzahlgetriebes eines Schleuderprüfstandes für Rotoren von Turboladern durchgeführt, vgl. Kapitel 8. Hier sollte die Drehzahl am Abtrieb von 250.000 1/min auf 350.000 1/min skaliert werden, wobei explizit eine rein geometrische Skalierung aufgrund der Anforderungen ausgeschlossen ist. Das vorliegende System wurde durch Dekomposition und Anwendung der erarbeiteten Methoden analysiert. Verschiedene Effekte und verschiedene Varianten von Entwürfen werden für verschiedene Funktionen unter dem Aspekt der Modellunsicherheit, der ausreichenden Erweiterung der Skalierungsgrenzen und weiterer Anforderungen verglichen. Resultat ist eine im Vergleich zum Ausgangspunkt hinsichtlich der Abbildung skalierungsrelevanter Effekte detailliertere Modellwelt, eine reduzierte Modellunsicherheit und eine gegenüber einem existierenden, konventionell skalierten Entwurf i.S. der Anforderungserfüllung und dem Entwicklungsaufwand günstigere Lösung für das Skalierungsproblem.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist damit eine auf Basis der Analyse der Schwachstellen klassischer Baureihenentwicklungsprozesse entstandene neue Baureihenentwicklungsmethodik, die durch Modelle und Methoden zur Analyse, Darstellung und Beherrschung von Skalierungsunsicherheit die effiziente und zielgerichtete Entwicklung skalierten Produkte ermöglicht.

---

## 9.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

---

Hinsichtlich des weiteren Forschungsbedarfs gibt es drei Felder, deren Erforschung für Produktentwickler in der Praxis lohnend sein kann. Dadurch können die in dieser Arbeit nur knapp besprochenen Themen vertieft bzw. in der Anwendung schwierige Aspekte der nBRE besser operationalisiert werden:

1. Die in dieser Arbeit angesprochene, aber noch nicht vertieft behandelte Interaktion von Baureihen und Baukästen bietet mutmaßlich weiteres Potenzial für die Verbesserung von Entwicklungsprozessen von Baureihen. Werden Komponenten als Baureihe entwickelt, sind sie häufig Bestandteil eines modularen Produkts. Dabei impliziert die Schnittstelle des Baukastens i.d.R. eine Abweichung von vollständiger Ähnlichkeit, denn das Modul muss in verschiedenen Größenstufen im Baukasten einsetzbar sein.

Gestaltungshinweise für skalierte Produkte mit Fokus auf die Schnittstelle zu Nachbarsystemen können dem Entwickler beim Konzipieren und Gestalten der Baureihe helfen.

2. Die in Abschnitt 6.2 eingeführte Skalierung integrierende Modellwelt ist ohne Rechnerunterstützung aufgrund der Vielzahl von Eigenschaften und Relationen nur schwer zu erstellen und zu verwenden. Eine Integration in Systeme des Product Lifecycle Managements, des Wissensmanagements und des Computer Aided Engineering kann die praktische Nutzbarkeit der in der nBRE entwickelten Ansätze erhöhen.
3. Die nBRE basiert auf VDI-2221-ähnlichen Entwicklungsprozessen und stammt daher aus dem Bereich der Entwicklung mechanischer Systeme. Ein interessantes Feld ist jedoch auch die

---

Entwicklung von Baureihen aus mechatronischen Systemen heraus. Mechatronik kann durch die geschickte Verwendung von Sensoren und Aktoren Unsicherheit reduzieren.<sup>392</sup>

Es ist denkbar, dass der Umfang einer Baureihe i.S. der Anzahl an Baureihengliedern durch den Einsatz aktiver Systeme reduziert werden kann, wenn ein aktives Produkt ein breiteres Spektrum an Einsatzszenarien abdecken kann. Hier bietet sich ein weiteres Potenzial zur Rationalisierung in der Produktentwicklung.

---

<sup>392</sup> Vgl. HEDRICH ET AL. 2015, S. 57 ff.

## A Bestimmen der Exponenten einer dimensionslosen Gleichung für den Biegebalken

Zur Bestimmung der Exponenten  $q_1, q_2$  und  $q_3$  aus der allgemeinen dimensionslosen Gleichung des Biegebalkens in Anlehnung an (2.12) können sowohl experimentelle Ergebnisse als auch Wissen aus axiomatischen Modellen herangezogen werden.

Die allgemeine dimensionslose Gleichung mit den in Unterabschnitt 2.2.4, Tabelle 2.3 gefundenen dimensionslosen Kennzahlen lautet für das zu beschreibende System  $j$

$$\Pi_j = \left( \frac{F}{El^2} \right)^{q_1} \left( \frac{r}{l} \right)^{q_2} \left( \frac{w}{l} \right)^{q_3} \quad (\text{A.1})$$

Mit dem Wissen, dass die Durchbiegung proportional zum Flächenträgheitsmoment für den Kreisquerschnitt, vgl. (A.2), folgt, dass der Radius in vierter Potenz auftreten muss. Damit folgt  $q_2 = \{4, -4\}$ . Mit dem Wissen, dass ein steigendes Flächenträgheitsmoment eine verringerte Durchbiegung zur Folge hat, muss  $q_2$  den Wert 4 annehmen, dies folgt aus (A.3), welche sich durch das Umstellen von (A.1) nach  $w$  ergibt. Aus dem Umstellen nach der Absenkung folgt gleichzeitig  $q_3 = 1$ .

$$I_a x = \frac{\pi}{4} \cdot r^4 \quad (\text{A.2})$$

$$w = \Pi_j l \left( \frac{F}{El^2} \right)^{-q_1} \left( \frac{r}{l} \right)^{-q_2} \quad (\text{A.3})$$

Außerdem beinhaltet der Faktor  $\Pi_j$  den Term  $\frac{\pi}{4}$  aus (A.2).

$q_1$  kann nun entweder aus dem Versuch, oder aus weiteren axiomatischen Modellen, wie z.B. der linearen Abhängigkeit einer Verformung vom Elastizitätsmodul  $E$  bestimmt werden. Wird  $q_1$  aus experimentellen Daten ermittelt, lässt sich dies durch einsetzen und auflösen der Gleichung nach  $q_1$  erreichen, auf dieselbe Weise wird  $\Pi_j$  ermittelt, jeweils unter der Annahme, dass  $q_{i,0} = q_{i,1}$ , vgl. (A.4). Aufgrund der zwei verbliebenen Variablen werden zwei Entwürfe mit mittiger Lasteinleitung und identischer Lagerung miteinander verglichen.

Entwurf	Kraft $F$	Länge $l$	Radius $r$	E-Modul $E$	Absenkung $w$
0	2000 N	1500 mm	24 mm	200 kN/mm <sup>2</sup>	2,70 mm
1	1813 N	1200 mm	20 mm	200 kN/mm <sup>2</sup>	2,60 mm

Tabelle A.1: Konkreter Entwurf des Biegebalkens und ermittelte Durchbiegung.

$$\frac{\log \left( (w_0/l_0) (r_0/l_0)^4 (1/\Pi_{j,0}) \right)}{\log (F_0 / (E_0 l_0^2))} = \frac{\log \left( (w_1/l_1) (r_1/l_1)^4 (1/\Pi_{j,1}) \right)}{\log (F_1 / (E_1 l_1^2))} \quad (\text{A.4})$$

Aus (A.4) kann mit den Werten aus A.1  $\Pi_j$  ermittelt werden, da  $\Pi_0 = \Pi_1$  gilt:

$$\Pi_j = 0,2653 \quad (\text{A.5})$$



Ein Vergleich mit den bekannten axiomatischen Modellen (Proportionalitätsfaktor der Durchbiegung in Bezug auf Geometrie und Last bei Fest-Los-Lagerung und mittlerer Krafteinleitung:  $1/48$ , Flächenträgheitsmoment mit Faktor  $\pi/4$ ) führt auf die Identität von (A.5) mit

$$\Pi_j = \frac{1}{48} \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right)^{-1} = \frac{1}{12\pi} \quad (\text{A.6})$$

Setzt man dieses Ergebnis sowie die bereits bekannten Exponenten  $q_1$  und  $q_2$  in (A.3) ein und ersetzt weiterhin die Variablen durch die Eigenschaften einer der Ausführungen in Tabelle A.1, folgt letztlich  $q_3 = -1$ . Damit lässt sich die dimensionslose Skalierungsgleichung für Biegebalken entsprechend Tabelle 2.3 mit

$$\frac{1}{12\pi} = \frac{wEr^4}{Fl^3} \quad (\text{A.7})$$

angeben. Bei geometrischer Ähnlichkeit reduziert sich (A.7) zu

$$C\pi = \frac{F}{El^2} \quad (\text{A.8})$$

worin  $C$  ein von der Schlankheit des Balkens abhängiger Proportionalitätsfaktor ist. Mit (A.8) ist gleichzeitig auch die HOOKE'sche Kennzahl  $Ho$  hergeleitet.

## B Skalierung eines Querpressverbandes

Die Berechnung des Querpressverbandes in Abbildung 3.3 erfolgte entsprechend KIRCHNER und BIRKHOFFER 2017, S. 288 ff. zugrunde gelegt sind folgende Annahmen und Randbedingungen:

- Skalierung der elastischen Kräfte und Momente entsprechend  $H_0$ , also  $\varphi_F = \varphi_L^2$
- Toleranzen nach DIN EN ISO 286-1 2010
- Ausgangspassung H8/u9 als breitest mögliche Toleranzfeldkombination, die im Grundentwurf kein Werkstoffversagen und kein Durchrutschen der Nabe hervorruft
- Zu übertragendes Drehmoment: 730 Nm, gleichzeitig

Merkmal	Wert
Material Nabe	EN-AW 7022
Material Welle	1C45
E-Modul Nabe	75 kN/mm <sup>2</sup>
E-Modul Welle	210 kN/mm <sup>2</sup>
Querkontraktionszahl Al.	0,34
Querkontraktionszahl St.	0,3
Rauigkeit der Nabe (Reiben)	4 $\mu\text{m}$
Rauigkeit der Welle(Rund-Längsschleifen)	2 $\mu\text{m}$
Fugendurchmesser $d_0$	70 mm
Haftreibungskoeffizient $\mu$	0,15
Zahnkraft $F_{ax}$	1620 N
Drehmoment $M$	730 Nm
Sicherheit gegen Durchrutschen $S_R$	2
Sicherheit gegen Bruch $S_B$	2

Tabelle B.1: Daten für den Grundentwurf des Querpressverbandes

---

## C Formeln zur Getriebeberechnung

---

Im folgenden Abschnitt werden die in dieser Arbeit verwandten Modelle zur Berechnung des Beispielgetriebes (Abschnitt 5.1 dargestellt).

Das Beispielgetriebe beruht auf realen Messdaten, die der Literatur entnommen wurden<sup>393</sup> sowie Stoffwerten, die ebenfalls der Literatur entnommen wurden<sup>394</sup>:

Merkmal	Wert
Leistung $P$	220 kW
Achsabstand	250 mm
Übersetzungsverhältnis $i$	3,17
Verlustleistung $P_V$	2,58 kW
Lager Ritzelwelle	32317
Lager Abtriebswelle	33024
kinematische Viskosität Schmierstoff $\nu_{\text{Öl}}$	$4,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}$
Dichte Öl $\rho_{\text{Öl}}$	$849 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Öltemperatur $t_{\text{Öl}}$	60 °C
Außentemperatur $t_u$	70 mm
Wärmedurchgangskoeffizient Grauguss	$52 \frac{\text{K}\cdot\text{m}^2}{\text{W}}$
Wanddicke Gehäuse	30 mm

Tabelle C.1: Eigenschaften des Grundentwurfs des einstufigen Stirnradgetriebes, vgl. Abbildung 3.1.

---

### C.1 Lagerverlustleistung

---

Die Lagerverlustleistung wird im Folgenden entsprechend Herstellerangaben betrachtet<sup>395</sup>, aus diesen werden Wachstumsgesetze abgeleitet.

Die Lagerverlustleistung setzt sich im Fall des Beispielgetriebes (Abbildung 3.1) aus dem Rollreibungsmoment  $M_{\text{rr}}$ , dem Gleitreibungsmoment  $M_{\text{sl}}$  und dem Reibungsmoment durch Planschverluste  $M_{\text{drag}}$  zusammen.

$$M_{\text{VL}} = M_{\text{rr}} + M_{\text{sl}} + M_{\text{drag}} \quad (\text{C.1})$$

Das Gesamtreibmoment lässt sich auch in lastabhängige und lastunabhängige Anteile aufteilen<sup>396</sup>:

$$M_{\text{VL}} = M_{\text{uab}} + M_{\text{ab}}. \quad (\text{C.2})$$

---

<sup>393</sup> Vgl. LEIMANN 1982, S. 40.

<sup>394</sup> Vgl. VDI-Wärmeatlas 2013, , diverse Stellen.

<sup>395</sup> Vgl. Wälzlagerpraxis: Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen 2015, S. 330 ff. und SKF 2014, S. 100 ff.

<sup>396</sup> Vgl. Wälzlagerpraxis: Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen 2015, S. 336. DAHLKE 1994, S. 280.

Diese Gleichung ist jedoch nur gültig, wenn das Lager nicht im Bereich der Mischreibung betrieben wird, also wenn gilt:

$$\kappa = \frac{\nu_{\text{Öl}}}{45.000 \cdot n^{-0,83} d_{\text{m}}^{-0,5}} \geq 2. \quad (\text{C.3})$$

Hieraus folgt eine Skalierungsgrenze, denn bei geometrischer Ähnlichkeit und  $Ca = \text{const.}$ , (3.6) bleibt der Nenner in Gleichung (C.3) nicht konstant:

$$n^{-0,83} d_{\text{m}}^{-0,5} \neq 1. \quad (\text{C.4})$$

Es folgt, sofern  $Ca = \text{const.}$ :

$$\varphi_{\kappa} = \varphi_{\text{L}}^{1/3} \varphi_{\text{t}}^{2/5}. \quad (\text{C.5})$$

Weiterhin geht in die Berechnung der einzelnen Reibmomente der mittlere Lagerdurchmesser  $d_{\text{m}}$  ein, welcher bei kleinen Lagern unterproportional zum Wälzkörperdurchmesser wächst. Eine näherungsweise geometrische Ähnlichkeit ist für Schrägkugellager etwa ab einem Wellendurchmesser von  $d = 45 \text{ mm}$  mit einem Verhältnis  $d_{\text{m}}/d \approx 1,4$  gegeben; für diesen Fall sind der Einfachheit halber die folgenden Gleichungen hergeleitet. Wird die Baureihe in Bereiche kleineren Maßstabs erweitert, tritt hier aufgrund übergeordneter Normen Halbähnlichkeit auf!

Aus

$$M_{\text{uab}} = f_0 \cdot 10^{-7} (\nu_{\text{Öl}} n)^{2/3} d_{\text{m}} \quad (\text{C.6})$$

ergibt sich, unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Schmierstoffs

$$\varphi_{\text{M,uab}} = \varphi_{\text{t,Öl}}^{4/15} \varphi_{\text{L}}^{7/4} \quad (\text{C.7})$$

sowie

$$\varphi_{\text{M,ab}} = \varphi_{\text{L}}^3 \quad (\text{C.8})$$

Die Wachstumsgesetze für Verlustleistungen ergeben sich aus den Wachstumsgesetzen für Reibmomente durch die Multiplikation mit Stufensprung der Winkelgeschwindigkeit  $\varphi_{\omega}$ , welcher bei CHAUCHY'scher Ähnlichkeit  $\varphi_{\text{L}}^{-1}$  entspricht.

---

## C.2 Verzahnungsverluste

---

Die Wachstumsgesetze der Verzahnungsverluste sind entsprechend der Literatur berechnet.<sup>397</sup> Ähnlich wie die Lagerverluste setzen sie sich aus leistungsabhängigen und leistungsunabhängigen Anteilen zusammen:

$$P_{VZ} = P_{VZ,ab} + P_{VZ,uab} \quad (C.9)$$

Mit der über die Verzahnung übertragenen Leistung  $P$ , dem mittleren Zahnreibungswert  $\mu_{mZ}$  und dem Geometriefaktor  $H_v$  ergibt sich:

$$P_{VZ,ab} = P \mu_{mZ} H_v \quad (C.10)$$

Bei geometrischer Ähnlichkeit folgt nun

$$\varphi_{P,VZ,ab} = \varphi_{7/4}^L \varphi_t^{-2/25} \quad (C.11)$$

Unter der Annahme, dass der Betriebspunkt, also die Umfangsgeschwindigkeit, über die Baureihe hinweg gleich bleibt ( $Ca$ -Ähnlichkeit), sowie dass die Viskosität des Öls gleich bleibt, ändert sich das Verhältnis der leistungsabhängigen und -unabhängigen Verluste der Verzahnung nicht.<sup>398</sup> Dementsprechend gilt für die Skalierung:

$$\varphi_{P,VZ} = \varphi_{P,VZ,ab} \quad (C.12)$$

Planschverluste der Zahnräder sind wie folgt zu berechnen:<sup>399</sup>

$$P_{VPI} = \frac{b y \nu_{\text{öl}}^{3/2}}{2,72 \cdot 10^6} \quad (C.13)$$

Woraus als Wachstumsgesetz folgt:

$$\varphi_{P,VPI} = \varphi_L^2 \varphi_t^{3/5} \quad (C.14)$$

---

<sup>397</sup> Vgl. LEIMANN 1982, S. 11 ff.

<sup>398</sup> Vgl. LEIMANN 1982, S. 16.

<sup>399</sup> Vgl. LEIMANN 1982, S. 38.

---

### C.3 Wärmeübertragung durch die Getriebewand

---

Die Wärmeabfuhr für das Beispiel der freien Konvektion an einer senkrechten Getriebewand stellt sich folgendermaßen dar:

Zunächst muss die Grashof-Zahl  $Gr$  sowohl für die Konvektion des Öls als auch der Umgebungsluft berechnet werden<sup>400</sup>, dies geschieht anhand von der Literatur entnommenen Stoffwerten<sup>401</sup>:

$$Gr = \frac{c^3 g \beta \Delta t}{\nu^2} \quad (C.15)$$

mit den Temperaturen der Wand innen und außen ( $t_{W,i}$  und  $t_{W,a}$ ) sowie des Öls und der Umgebung ( $t_{Öl}$  und  $t_U$ ) sind die treibenden Temperaturdifferenzen zu bilden:

$$\Delta t_i = t_{Öl} - t_{W,i} \quad (C.16)$$

$$\Delta t_a = t_{W,a} - t_U \quad (C.17)$$

Als nächstes muss die Prandtl-Zahl  $Pr$  beschafft werden; sie lässt sich für die jeweilige angenommene Temperatur des Fluids aus der Literatur entnehmen.<sup>402</sup>

Mit  $Gr$  und  $Pr$  lässt sich die jeweilige mittlere Nusselt-Zahl  $Nu_m$  bilden<sup>403</sup>:

$$Nu_m = \frac{0,902 \cdot Pr^{\frac{1}{2}}}{0,861 + Pr^{\frac{1}{4}}} \cdot \left( \frac{Gr}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (C.18)$$

Mit  $Nu_m$  ergibt sich der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  zu<sup>404</sup>:

$$\alpha = \frac{Nu_m}{L} \lambda = \frac{0,902 \cdot Pr^{\frac{1}{2}}}{(0,861 + Pr)^{\frac{1}{4}}} \cdot \left( \frac{g \beta \Delta t \lambda^4}{4 L \nu^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (C.19)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient ist dementsprechend von der charakteristischen Länge (hier die Wanddicke  $s$ ) des Problems, also dem Maßstab, abhängig. Zusammen mit dem Wärmedurchgangswiderstand der Getriebewand, Wanddicke  $s$ ,

$$R_W = \frac{s}{\lambda_{WA}} \quad (C.20)$$

ergibt sich der Gesamtwärmeübergangswiderstand der Getriebewand zu<sup>405</sup>

$$R_{ges} = \frac{1}{\alpha_{Öl} A} + \frac{s}{\lambda_W} + \frac{1}{\alpha_U A} \quad (C.21)$$

---

<sup>400</sup> Vgl. STEPHAN ET AL. 2013, S. 406.

<sup>401</sup> Vgl. VDI-Wärmeatlas 2013, S. 215, S. 536.

<sup>402</sup> Vgl. VDI-Wärmeatlas 2013, S. 197, S. 215.

<sup>403</sup> Vgl. STEPHAN ET AL. 2013, S. 434.

<sup>404</sup> Vgl. VDI-Wärmeatlas 2013, S. 754.

<sup>405</sup> Vgl. STEPHAN ET AL. 2013, S. 406.

Woraus unter Vernachlässigung der Flächen die spezifische Wärmeleistung berechnet werden kann:

$$\dot{q} = \frac{T_{\text{Öl}} - T_U}{R_{\text{ges}}} = \frac{T_{\text{Öl}} - T_U}{\frac{(0,861+Pr)^{\frac{1}{4}} \cdot (4L\nu_{\text{Öl}}^2)^{\frac{1}{4}}}{0,902 \cdot Pr^{\frac{1}{2}} g \beta_{\text{Öl}} \Delta t_i \lambda_{\text{Öl}}} + \frac{L}{\lambda_W} + \frac{(0,861+Pr)^{\frac{1}{4}} \cdot (4L\nu_U^2)^{\frac{1}{4}}}{0,902 \cdot Pr^{\frac{1}{2}} g \beta_U \Delta t_a \lambda_U}} \quad (\text{C.22})$$

Der Wärmedurchgangswiderstand der Grauguss-Getriebewand ist erheblich kleiner als die Wärmeübergangswiderstände (etwa drei Größenordnungen), wodurch er in sehr guter Näherung vernachlässigt werden kann. Werden die Gleichungen für die absolute übertragbare Wärmeleistung  $\dot{q}$ , welche bei gegebener Öl- und Außentemperatur der Verlustleistung  $P_{\text{VL}}$  entspricht, zweier Entwürfe unter Vernachlässigung des Wärmedurchgangswiderstandes und bei gleicher Erdbeschleunigung in allen Maßstäben ins Verhältnis gesetzt, folgt ein aus Stufensprüngen und Relativgrößen zusammengesetztes Wachstumsgesetz:

$$\varphi_{\dot{Q}} = \varphi_L^{1,75} \varphi_{\Delta T, \text{ges}} \cdot \left( \frac{1}{\varphi_{\nu, \text{Öl}}^{-2} \varphi_{\beta, \text{Öl}}^{-1} \varphi_{\Delta t, \text{W,a}}^{-1} \varphi_{\lambda, \text{Öl}}^{-1} + \frac{\nu_{\text{U},0}^2 \beta_{\text{Öl},1} \Delta t_{i,1} \lambda_{\text{Öl},1}}{\nu_{\text{Öl},1} \beta_{\text{U},0} \Delta t_{a,0} \lambda_{\text{U},0}}} + \frac{1}{\varphi_{\nu, \text{U}}^{-2} \varphi_{\beta, \text{U}}^{-1} \varphi_{\Delta t, \text{W,i}}^{-1} \varphi_{\lambda, \text{U}}^{-1} + \frac{\nu_{\text{Öl},0}^2 \beta_{\text{U},1} \Delta t_{a,1} \lambda_{\text{U},1}}{\nu_{\text{U},1} \beta_{\text{Öl},0} \Delta t_{i,0} \lambda_{\text{Öl},0}}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{C.23})$$



---

## D Auswahl von potenziell skalierungskritischen Effekten mit nicht stetigem Wachstum oder ungewöhnlichen Wachstumsexponenten

---

Es fällt auf, dass durch die Recherche kaum Beispiele für unstetiges Produktverhalten gefunden werden konnten. Auch das angesprochene Beispiel der Kapillarwirkung ist bei infinitesimal kleinen Stufensprüngen zwischen den Größenvarianten einer Baureihe nicht unstetig. Einige Effekte jedoch zeigen ein so stark nichtlineares Verhalten, dass sie in manchen Bereichen schon bei kleinen Änderungen der Eingangsgrößen eine große Änderung der Zielgröße aufweisen (z.B. die Coulombkraft oder die Lorentzkraft). Hier kann es passieren, dass zwischen zwei Größenvarianten eine so starke Abweichung der Zielgröße eines physikalischen Effekts auftritt, dass das Systemverhalten quasi-unstetig wird.

Tabelle D.1: Potenziell kritische Skalierungseffekte

Effekt- klasse	Effekt	Erläuterung
Mechanische Effekte	Festigkeitsabnahme	Die Festigkeit eines Werkstoffs nimmt mit steigendem Werkstoffvolumen wegen einer statistisch erhöhten Fehlstellendichte ab. <sup>406</sup> Das gilt auch für die Betriebsfestigkeit, hier ist das höchst beanspruchte Werkstoffvolumen maßgebend. <sup>407</sup>
	Stabilitätsverlust	Imperfektionen (z.B. Vordeformationen) führen zu rasch ansteigenden Verformungen an stabilitätsgefährdeten Strukturen. Bei unterproportionalem Wachstum der Varianz sind verkleinerte Entwürfe anfälliger für Stabilitätsversagen. <sup>408</sup>
	Gravitation	Der Einfluss der Schwerkraft auf die elastischen Verformungen eines Systems wird häufig vernachlässigt, er wächst in dritter Potenz, während Kräfte nach $Ho$ oder $Ca$ nur in zweiter Potenz wachsen dürfen. Ein anderes Verhalten zeigen die aus der Gravitation zwischen zwei Massen resultierenden Gewichtskräfte: sie hängen quadratisch vom Abstand ihrer Schwerpunkte ab <sup>409</sup> und sind damit umgekehrt proportional zu den Forderungen aus $Ho$ oder $Ca$ .
	Abnahme der Kriechgeschwindigkeit	Zumindest für Lote konnte gezeigt werden, dass besonders kleine Materialvolumina bei sehr kleinskaligen Bauteilen eine erheblich geringere Kriechgeschwindigkeit unter konstanter Beanspruchung zeigen, als größere Lotvolumina. <sup>410</sup> Dies steht im Widerspruch zu $Ne$ und $Ca$ .

<sup>406</sup> Vgl. VOLLERTSEN ET AL. 2009, S. 567 und GRIFFITH 1921, S. 180 f.

<sup>407</sup> Vgl. HAIBACH 2006, S. 536.

<sup>408</sup> Vgl. WIEDEMANN 2007, S. 127.

<sup>409</sup> Vgl. KOLLER 1998, S. 561.

<sup>410</sup> Vgl. WIESE 2010, S. 9.

Effekt- klasse	Effekt	Erläuterung
Tribologische Effekte	Härtezunahme	Je geringer die Eindringtiefe eines Prüfkörpers in eine metallische Oberfläche ist, desto größer ist die gemessene Härte. <sup>411</sup> Dies kann für tribologische Fragestellungen von Bedeutung sein. <sup>412</sup>
	Mikrostruktureffekte	Durch eine verringerte Größe von schmierstoffgefüllten Taschen steigt der Reibungskoeffizient $\mu$ an. <sup>413</sup> Bezüglich Trockenreibung sind die Ergebnisse uneindeutig. <sup>414</sup>
Elektrische/magnetische Effekte	Anstieg der Lorentzkraft	Quadratischer Zusammenhang der Lorentzkraft in Abhängigkeit des Luftspalts zwischen zwei Magneten – bei kleinen Spalten wird die Kraft schnell sehr groß, der Luftspalt darf nicht geometrisch mit skaliert werden, auch varianzbedingte Maßstabsabhängigkeit ist zu unbedingt berücksichtigen. <sup>415</sup>
	Schneller Anstieg der Coulombkraft	Ein geladenes Objekt wird bei sich verringerndem Abstand überproportional stark angezogen bzw. abgestoßen, die Kraft ist quadratisch abhängig von der Dicke des Luftspalts, es gelten dieselben Hinweise wie für die Lorentzkraft. <sup>416</sup>
	Spezifischer elektrischer Widerstand	Der spezifische Widerstand eines Leiters nimmt mit der Querschnittsfläche zu. Grund hierfür ist ebenfalls die höhere Fehlstellendichte: Elektronen werden an Fehlstellen gestreut, was eine Widerstandszunahme bedeutet. <sup>417</sup> Dies ist das elektrotechnische Analogon zum Größeneffekt der Festigkeit, vgl. Eintrag unter „Mechanische Effekte“.

<sup>411</sup> Vgl. SWADENER ET AL. 2002, S. 691 f.

<sup>412</sup> Vgl. VOLLERTSEN ET AL. 2009, S. 567.

<sup>413</sup> Vgl. VOLLERTSEN ET AL. 2009, S. 567.

<sup>414</sup> Vgl. VOLLERTSEN ET AL. 2009, S. 572.

<sup>415</sup> Vgl. HAGMANN 2008, S. 196 f.

<sup>416</sup> Vgl. HAGMANN 2008, S. 119.

<sup>417</sup> Vgl. ASHCROFT und MERMIN 2007, S. 273.

Effekt- klasse	Effekt	Erläuterung
Stömungsmechanische Effekte	Sperrender Querschnitt	Ein durchströmter Querschnitt kann sperren, wenn die Machzahl im engsten Querschnitt den Wert 1 erreicht. Eine Erhöhung des Massenstroms ist dann nur noch möglich, wenn die Temperatur gesenkt oder der Totaldruck erhöht werden. Der sog. reduzierte Massenstrom, eine dimensionslose Kennzahl, bleibt hingegen bei einem gesperrten Querschnitt konstant. <sup>418</sup>
	Turbulenz der Grenzschicht	Nimmt die charakteristische Länge eines Strömungsproblems zu, während die Viskosität des Mediums gleich bleibt, kann die Grenzschicht einer Strömung turbulent werden, was eine erhöhte Reibung zur Folge hat. <sup>419</sup>
	Gesetz von Toricelli / Volumenstrom beim Ausfluss aus einem Behälter	Die Austrittsgeschwindigkeit einer Flüssigkeit aus dem Abfluss eines Behälters wächst bei geometrischer Ähnlichkeit des Behälters unterproportional mit der Höhe des Flüssigkeitspegels (Potenz 1/2). <sup>420</sup>
	Kapillarität	Die Steighöhe einer Flüssigkeit in einem engen Querschnitt hängt mit der Potenz $-2$ von der Querschnittsfläche ab, bei geometrisch ähnlichen Entwürfen sinkt die Steighöhe also umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Länge und weicht damit fünf Potenzen von der geometrischen Ähnlichkeit ab. <sup>421</sup>

<sup>418</sup> Vgl. BRÄUNLING 2015, S. 320 f.

<sup>419</sup> Vgl. SPURK und AKSEL 2010, S. 219 ff.

<sup>420</sup> Vgl. KOLLER 1998, S. 558.

<sup>421</sup> Vgl. KOLLER 1998, S. 589.

Effekt- klasse	Effekt	Erläuterung
Thermodynamische Effekte	Schmelztemperatur	Zumindest bei sehr kleinen Partikelgrößen kann eine Senkung der Schmelztemperatur kristalliner Werkstoffe beobachtet werden. Dies ist für Herstellungsprozesse relevant, wenn Partikelgrößen auch von der Produktgröße abhängen. <sup>422</sup>
	Konvektion	Die für die Ähnlichkeit von Konvektionsvorgängen wichtige dimensionslose Kennzahl $Gr$ (GRASHOF-Zahl) hängt kubisch von der charakteristischen Länge ab <sup>423</sup> und ist damit sehr skalierungssensitiv. Weiterhin sind die für die Konvektion relevanten Kennzahlen PRANDTL-Zahl ( $Pr$ ), wiederum die Grashof-Zahl und die von ihnen abgeleiteten Kennzahlen aufgrund der oft nicht mit der Größe eines Entwurfs veränderlichen Viskosität des Umgebungsmediums eine Quelle nichtlinearen Verhaltens. <sup>424</sup>
	Wärmeleitung	Die Fourier-Zahl ist quadratisch abhängig von der charakteristischen Länge eines Problems. Hierdurch entsteht nichtlineares Verhalten. <sup>425</sup>
Optische Effekte	Beugung	Wenn ein von einer Lichtquelle angestrahltes Objekt nicht mehr als groß gegenüber der Wellenlänge des Lichts angesehen werden kann, kommt es zu erheblichen Abweichungen von der klassischen Strahlenoptik, da Beugungserscheinungen auf diesen Maßstäben dominieren. <sup>426</sup>

<sup>422</sup> Vgl. BOREL 106, S. 4.

<sup>423</sup> Vgl. STEPHAN ET AL. 2013, S. 418.

<sup>424</sup> Ebenda.

<sup>425</sup> Vgl. STEPHAN ET AL. 2013, S. 412.

<sup>426</sup> Vgl. ARDENNE ET AL. 2005, S. 706.

Effekt- klasse	Effekt	Erläuterung
Technologische Effekte	Höhere Lunkerichte, Fehlstellen	Bei Gussteilen kommt es bei größeren Bauteilvolumina bzw. größeren Wanddicken mit größerer Wahrscheinlichkeit zu Schwindungsrissen und Lunkern. Diese setzen aufgrund der Querschnittsreduktion Festigkeit und Steifigkeit herab; die Festigkeit wird zudem durch Kerbwirkung vermindert. <sup>427</sup>
	Verändertes Materialgefüge	Durch langsames Abkühlen größerer Materialvolumina nach dem Guss von metallischen Werkstoffen stellt sich ggf. ein anderes Gefüge ein als bei kleinerem Materialvolumen. Dies kann sowohl die Korngrößen als auch die Art des Gefüges betreffen. <sup>428</sup> Dadurch ändern sich auch die Festigkeit sowie die Bruchdehnung des Materials.
	Veränderter Energiebedarf / Volumenstrom beim Ausfluss aus einem Behälter	Veränderter Energiebedarf Bei geringerer Spandicke steigt z.B. beim Schleifen die für den Materialabtrag benötigte Energie aufgrund des Größeneffekts an. <sup>429</sup> Werden kleine Bauteile mit geringeren Zustellungen gefertigt, kommt es zu erhöhtem Energieeintrag und den damit verbundenen Effekten auf Bauteil und Werkzeug.
	Minimale Wanddicke	Bei Gussprozessen sind minimale Wanddicken dadurch vorgegeben, dass die Schmelze die Kavität vollständig ausfüllen muss, bevor sie erstarrt. Bei Verkleinerungen eines Grundentwurfs kann es zu höheren relativen Wanddicken kommen.
Akustische Eff.	Schalldissipation	Die Schallintensität hängt vom Abstand zur Schallquelle ab. Die dissipierte Energie berechnet sich über eine Formel, in der der Abstand als Exponent zur Eulerzahl $e$ eingeht. Der Zusammenhang ist dadurch stark nichtlinear. <sup>430</sup>

<sup>427</sup> Vgl. GROTE und ANTONSSON 2008, S. 549 f.

<sup>428</sup> Vgl. GROTE und ANTONSSON 2008, S. 162.

<sup>429</sup> Vgl. BRINKSMEIER und GIWERZEW 2003, S. 8.

<sup>430</sup> Vgl. KOLLER 1998, S. 569.

## E Beispiel für die Auswirkung einer Störgröße auf eine Skalierung – Laser-Entfernungsmessung bei Temperaturschwankungen

In Abbildung E.1 ist die Prinzipskizze eines Systems dargestellt, in welchem ein Laser eine Entfernungsmessung durchführen soll. In einem skalierten Prozess ändert sich die Lauflänge des Laser, also der Abstand von Emittor zu Messobjekt. Im Tagesverlauf schwankt die Temperatur des Umgebungsmediums des Operators, was Auswirkungen auf die Messung hat. Diese ist entsprechend der folgenden Herleitung abhängig von der Messlänge (also auch der Baugröße).

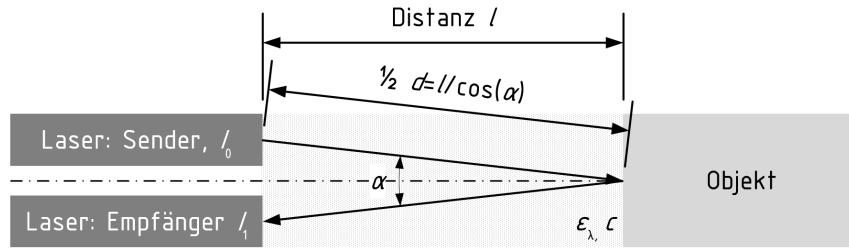


Abbildung E.1: Eine Distanzmessung via Laser führt zu Extinktion in Abhängigkeit des Umgebungsmediums.

Die Intensität  $I_1$  nach einer Lauflänge  $d$  wird in Abhängigkeit der Ursprungsintensität  $I_0$  durch das LAMBERT-BEER'sche Gesetz beschrieben,  $\epsilon_\lambda$  und  $c$  sind Stoffkonstanten:<sup>431</sup>

$$I_1 = I_0 / e^{\epsilon_\lambda \cdot c \cdot d}. \quad (\text{E.1})$$

Daraus folgt das Wachstumsgesetz

$$\varphi_{I_1} = \varphi_{I_0} / e^{\epsilon_\lambda \cdot c \cdot (d_1 - d_0)}. \quad (\text{E.2})$$

Mit der Anforderung, dass die Intensität am Sensor gleich bleiben soll, ergibt sich

$$\varphi_{I_0} = e^{\epsilon_\lambda \cdot c \cdot (d_1 - d_0)}. \quad (\text{E.3})$$

Da  $\epsilon_\lambda$ , der dekadische Extinktionskoeffizient, auch von der Temperatur abhängig ist, aber mit dem Absolutwert der Eigenschaftsänderung der Lauflänge multipliziert wird, hat eine Temperaturänderung im Messprozess eine von der Messlänge abhängige Auswirkung.<sup>432</sup>

<sup>431</sup> Vgl. ARDENNE ET AL. 2005, S. 509 ff.

<sup>432</sup> Ebenda.



---

## Literatur

---

- ABELE, E., R. ANDERL und H. BIRKHOFFER (2005). *Environmentally-Friendly Product Development: Methods and Tools*. London: Springer.
- AHMAD, N., D. C. WYNN und C. P. JOHN (2012). „Change impact on a product and its redesign process: a tool for knowledge capture and reuse“. In: *Research in Engineering Design* 24, S. 219–244. DOI: 10.1007/s00163-012-0139.
- ALBERS, A., N. BURSAC und E. WINTERGERST (2015). „Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive“. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2015*. Hrsg. von H. BINZ, B. BERTSCHE, W. BAUER und D. ROTH. Stuttgart: Fraunhofer IAO, S. 1–10.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME) - PTC 60 / V&V 10, Hrsg. (2006). *Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*.
- ANDREASEN, M. M. und L. HEIN (1987). *Integrated Product Development*. Kempston, Bedford: IFS (Publications) Ltd.
- ARDENNE, M. v., G. MUSIOL und U. KLEMRADT (2005). *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*. 3. Aufl. Frankfurt am Main: Harri Deutsch.
- ASHCROFT, N. W. und N. D. MERMIN (2007). *Festkörperphysik*. 3., verb. Aufl. München u.a.: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- BENDER, B. (2004). *Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung*. Bd. 377. Reihe 1: Konstruktionstechnik / Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI. DOI: 10.14279/depositonce-1006.
- BERGMAN, B. und M. ARVIDSSON (2009). „Introduction“. In: *Robust Design Methodology for Reliability*. Hrsg. von B. BERGMAN, J. DE MARÉ, S. LORÉN und T. SVENSSON. Chichester: John Wiley & Sons, S. 3–14.
- BERGMAN, B., J. DE MARÉ, S. LORÉN und T. SVENSSON, Hrsg. (2009). *Robust Design Methodology for Reliability: Exploring the Effects of Variation and Uncertainty*. Chichester: John Wiley & Sons.
- BERTSCHE, B., P. GÖHNER, U. JENSEN, W. SCHINKÖTHE und H.-J. WUNDERLICH (2009). *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. VDI-Buch. Berlin: Springer.
- BIERKENS, M. F., P. A. FINKE und P. DE WILLIGEN (2000). *Upscaling and Downscaling Methods for Environmental Research*. Bd. 88. Developments in Plant and Soil Sciences. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- BIRKHOFFER, H. (1980). *Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte*. Bd. 70. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- (2017). „Produktionnovation: Sommersemester 2017“. Skript. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

- BIRKHOFFER, H., H. KLOBERDANZ, T. SAUER und B. BERGER (2002). „Why Methods Don't Work and How to Get them to Work“. In: *Proceedings of the EDIProD 2002*. Hrsg. von R. ROHATYNSKI, S. 29–36.
- BOREL, J. P. (106). „Thermodynamical Size Effect And The Structure of Metallic Cluster“. In: *Surface Science* 1981.1-3, S. 1–9. DOI: 10.1016/0039-6028(81)90173-4.
- BRÄUNLING, W. J. G. (2015). *Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme*. 4. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-642-34539-5.
- BRIDGMAN, P. W. (1963). *Dimensional analysis*. New Haven: Yale University Press.
- BRINKSMEIER, E. und A. GIWERZEW (2003). „Characterization of the size effect and its influence on the workpiece residual stresses in grinding“. In: *Process Scaling: Proceedings of the 1st Colloquium of DFG Priority Program Process Scaling*. Hrsg. von F. VOLLERTSEN. Bremen: BIAS-Verlag, S. 1–8.
- BUCKINGHAM, E. (1914). „On Physically Similar Systems - Illustrations of the Use of Dimensional Equations“. In: *Physical Review* 4.4, S. 345–376. DOI: 10.1103/PhysRev.4.345.
- CHOI, H.-J. (2005). „A Robust Design Method for Model and Propagated Uncertainty“. Dissertation. Atlanta: Georgia Institute of Technology.
- CHRISTENSEN, M. E. (2015). „Applying Robust Design in an Industrial Context“. Diss. Lyngby: Technical University of Denmark.
- CHRISTENSEN, M. E., T. J. HOWARD und J. J. RASMUSSEN (2012). „The Foundation for Robust Design: Enabling Robustness Through Kinematic Design and Design Clarity“. In: *Proceedings of the DESIGN 2012, the 12th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*. Hrsg. von D. MARJANOVIC, M. STORGA, N. PAVKOVIC und N. BOJCETIC. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, The Design Society, Glasgow, S. 817–826.
- CONRAD, P., H. SCHIEMANN und P. G. VÖMEL (1977). *Erfolg durch methodisches Konstruieren: Ein Leitfaden für Studium und Praxis*. 1. Aufl. Grafenau/Württ.: Lexika-Verlag.
- COOPER, R. G. (1990). „Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products“. In: *Business Horizons* 33.3, S. 44–54. DOI: 10.1016/0007-6813(90)90040-I.
- DIN 1313 (1998). *Größen*. Berlin.
- DIN 31000 (2017). *Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten von Produkten*. Berlin.
- DIN 31652-1 (2017). *Gleitlager - Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb - Teil 1: Berechnung von Kreiszyylinderlagern*. Berlin.
- DIN 323-1 (1974). *Normzahlen und Normreihen - Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte*. Berlin.
- DIN 323-2 (1974). *Normzahlen und Normzahlreihen - Einführung*. Berlin.
- DIN 743-2 (2012). *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen*. Berlin.

- 
- DIN EN ISO 286-1 (2010). *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen (ISO 286-1:2010); Deutsche Fassung EN ISO 286-1:2010*. Berlin.
- DIN EN ISO 9241-210 (2011). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010)*. Berlin.
- DAHLKE, H. (1994). *Handbuch Wälzlagertechnik: Bauarten, Gestaltung, Betrieb*. 2. Aufl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg.
- DE WECK, O., C. ECKERT und P. J. CLARKSON (2007). „A Classification of Uncertainty for Early Product and System Design“. In: *Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design*. Hrsg. von J.-C. BOQUET. The Design Society, S. 1–12.
- DEIMEL, M. (2007). *Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen Synthese, Beurteilung und Optimierung von Konstruktionslösungen*. Bd. 398. Reihe 1: Konstruktionstechnik / Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- (2009a). „Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen konstruktiven Lösungsfindung (Teil 1)“. In: *Konstruktion* 61.3, S. 67–73.
  - (2009b). „Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen konstruktiven Lösungsfindung (Teil 2)“. In: *Konstruktion* 61.3, S. 67–71.
- DEMING, W. E. (1982). *Out of the Crisis*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- DUNGAN, J. L., J. N. PERRY, M. R. T. DALE, P. LEGENDRE, S. CITRON-POUSTY, M.-J. FORTIN, A. JAKOMULSKA, M. MIRITI und M. S. ROSENBERG (2002). „A balanced view of scale in spatial statistical analysis“. In: *Ecography* 25.5, S. 626–640. DOI: 10.1034/j.1600-0587.2002.250510.x.
- EHRENSPIEL, K. und H. MEERKAMM (2013). *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit: 5. überarbeitete und erweiterte Auflage*. 5. Aufl. München: Carl Hanser.
- EHRENSPIEL, K., A. KIEWERT, U. LINDEMANN und M. MÖRTL (2014). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 7. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-41959-1.
- EIFLER, T. (2015). *Modellgestützte Methodik zur systematischen Analyse von Unsicherheit im Lebenslauf technischer Systeme*. Bd. 432. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- ENGELHARDT, R. A. (2013). *Uncertainty Mode and Effects Analysis - heuristische methodik zur analyse und Beurteilung von Unsicherheiten in technischen Systemen des Maschinenbaus*. Bd. 418. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- ENGELHARDT, R., H. KLOBERDANZ, J. MATHIAS und H. BIRKHOFFER (2010). „An Approach of a Model to Describe Uncertainty in Technical Systems“. In: *Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*. Hrsg. von D. MARJANOVIC, M. STORGA, N. PAVKOVIC und N. BOJCETIC. Dubrovnik: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, The Design Society, Glasgow, S. 213–222.

- 
- ENGELHARDT, R., J. KOENEN, M. BRENNEIS, H. KLOBERDANZ und A. BOHN (2012). „An approach to classify methods to control uncertainty in load-carrying structures“. In: *Applied Mechanics and Materials* 104, S. 33–44.
- ENGINEERING DESIGN CENTRE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE (2009). *Cambridge Advanced Modeller*. URL: <https://www-edc.eng.cam.ac.uk/cam/> (besucht am 18.07.2017).
- EUCLID (1651). *Euclides Elements of geometry: the first VI books, in a compendious form contracted and demonstrated*. London: Robert and William L.
- FELDHUSEN, J. und K.-H. GROTE (2013a). „Der Produktentstehungsprozess (PEP)“. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Hrsg. von J. FELDHUSEN und K.-H. GROTE. Berlin: Springer Vieweg, S. 11–24.
- Hrsg. (2013b). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.
- FELDHUSEN, J., K.-H. GROTE, A. NAGARAJAH, G. PAHL, W. BEITZ und S. WARTZACK (2013). „Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses“. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Hrsg. von J. FELDHUSEN und K.-H. GROTE. Berlin: Springer Vieweg, S. 291–410.
- FIRCHAU, N. L. (2003). *Variantenoptimierte Produktgestaltung*. Institut für Konstruktionstechnik TU Braunschweig, Bericht Nr. 65. Göttingen: Cuvillier.
- FREUND, T., J. WÜRTEMBERGER, S. CALMANO, D. HESSE und H. KLOBERDANZ (2014). „Robust Design of Active Systems - An Approach to Considering Disturbances within the Selection of Sensors“. In: *First International Symposium on Robust Design Proceedings*. Hrsg. von T. J. HOWARD und T. EIFLER. Copenhagen, Denmark, S. 147–157. DOI: 10.4122/dtu:2102.
- FREUND, T., J. WÜRTEMBERGER, P. BLAKAJ und H. KLOBERDANZ (2015). „An approach to using elemental interfaces to assess design clarity“. In: *Uncertainty in Mechanical Engineering II*. Hrsg. von P. PELZ und P. GROCHE. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, S. 109–117.
- FREUND, T., J. LOTZ, J. WÜRTEMBERGER und H. KLOBERDANZ (2016). „Applying the elemental interfaces approach to kinematic design“. In: *Proceedings of the DESIGN 2016*. Hrsg. von D. MARJANOVIC, M. STORGA, N. PAVKOVIC, N. BOJCETIC und S. SKEC. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, The Design Society, Glasgow.
- FRICKE, G. (1993). *Konstruieren als flexibler Problemlöseprozeß: Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren*. Bd. 227. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- GERHARD, E. (1969). „Ähnlichkeitsgesetze beim Entwurf elektromechanischer Geräte“. In: *VDI-Z* 111.14, S. 1013–1019.
- (1971). „Das Ähnlichkeitsprinzip als Konstruktionsmethode in der Elektrotechnik“. Dissertation. Darmstadt: Technische Hochschule Darmstadt.
- GERO, J. S. und U. KANNENGIESSER (2007). „A function–behavior–structure ontology of processes“. In: *AI EDAM* 21.04, S. 379–391. DOI: 10.1017/S0890060407000340.

- GÖHLER, S. M., S. HUSUNG und T. J. HOWARD (2016). „The Translation between Functional Requirements and Design Parameters for Robust Design“. In: *Procedia CIRP* 43, S. 106–111. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.028.
- GRAMLICH, S. (2013). *Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln: Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus*. Bd. 423. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- GRIFFITH, A. A. (1921). „The Phenomena of Rupture and Flow in Solids“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 221.582–593, S. 163–198. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006.
- GROTE, K.-H. und E. K. ANTONSSON, Hrsg. (2008). *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. New York: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-30738-9.
- HWG (2017). *Hybridkugellager*. URL: <http://h-w-g.com/?wpdmact=process&did=MTkuaG90bGluaw==> (besucht am 26.07.2017).
- HAGMANN, G. (2008). *Grundlagen der Elektrotechnik: Das bewährte Lehrbuch für Studierende der Elektrotechnik und anderer technischer Studiengänge ab 1. Semester ; mit 4 Tabellen, Aufgaben und Lösungen*. 13., durchges. und korrigierte Aufl. Wiebelsheim: AULA-Verl.
- HAIBACH, E. (2006). *Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 3., korrigierte und erg. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer.
- HAMRAZ, B., N. H. CALDWELL, T. W. RIDGMAN und P. J. CLARKSON (2015). „FBS Linkage ontology and technique to support engineering change management“. In: *Research in Engineering Design* 26.1, S. 3–35. DOI: 10.1007/s00163-014-0181-9.
- HANSELKA, H. und R. PLATZ (2010). „Ansätze und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“. In: *Konstruktion* 11/12-2010, S. 55–62.
- HANSELKA, H., P. GROCHE und R. PLATZ, Hrsg. (2011). *Uncertainty in Mechanical Engineering: Proceedings of the 1st International Conference on Uncertainty in Mechanical Engineering (ICUME 2011)*. Bd. 104. Applied Mechanics and Materials. Trans Techn Publications. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.104.
- HANSEN, F. (1955). *Konstruktionssystematik: Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure*. Berlin: VEB Verlag Technik.
- HEDRICH, P., F. J. CLOOS, J. WÜRTENBERGER und P. F. PELZ (2015). „Comparison of a New Passive and Active Technology for Vibration Reduction of a Vehicle Under Uncertain Load“. In: *Applied Mechanics and Materials* 807, S. 57–66. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.807.57.
- HEIDEMANN, B. (2001). *Trennende Verknüpfung - Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen*. Bd. 351. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- HERRMANN, W. (1930). „Die Anwendung des Ähnlichkeitsprinzips der Mechanik auf zeitlich beliebig veränderliche Vorgänge mit besonderer Berücksichtigung schiffbaulicher und aerodynamischer Probleme“. In: *Jahrbuch der Schiffsbau technischen Gesellschaft* 31, S. 355–389.



- 
- HERTZ, H. (1894). *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt: Geesammelte Werke*. Bd. 3. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- HILGERT, J. (2005). „Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zur experimentellen Eigenschaftsabsicherung eines Bahnplanverfahrens für Fahrzeugführungssysteme“. Dissertation. Duisburg: Universität Duisburg Essen.
- HOWARD, T. J., M. E. CHRISTENSEN, T. EIFLER, S. M. GÖHLER, A. CHRISTIANSEN und A. RAFN (2014). „The Variation Management Framework (VMF) for Robust Design“. In: *First International Symposium on Robust Design Proceedings*. Hrsg. von T. J. HOWARD und T. EIFLER. Copenhagen, Denmark, S. 171–175. DOI: 10.4122/dtu:2104.
- HUBKA, V. und W. E. EDER (1988). *Theory of technical systems: A total concept theory for engineering design*. Berlin und New York: Springer-Verlag.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (2008). *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Corrected Version 2010*.
- KEMMLER, S. und B. BERTSCHE (2014). „Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing (SMART)“. In: *First International Symposium on Robust Design Proceedings*. Hrsg. von T. J. HOWARD und T. EIFLER. Copenhagen, Denmark, S. 111–122. DOI: 10.4122/dtu:2098.
- KIRCHNER, E. (2007). *Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben: Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten*. VDI-Buch. Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-35292-1.
- KIRCHNER, E. und H. BIRKHOFFER (2017). *Maschinenelemente und Mechatronik II*. 4. Aufl. Skripte im Shaker Verlag. Aachen: Shaker.
- KLEIBER, M. (1967). *Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier : Ein Lehrbuch d. Tierenergetik: "The Fire of Life": Ein Lehrbuch der Tiergenetik*. Hamburg: Parey.
- KLOBERDANZ, H. (1991). *Rechnerunterstützte Baureihenentwicklung*. Düsseldorf: VDI.
- KLOBERDANZ, H., R. ENGELHARDT, J. MATHIAS und H. BIRKHOFFER (2009). „Process based uncertainty analysis - an approach to analyse uncertainties using a process model“. In: *Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design*. Hrsg. von M. NORELL BERGENDAHL, M. E. GRIMHEDEN, L. LEIFER, P. SKOGSTAD und U. LINDEMANN. Bd. 2. The Design Society, S. 465–474.
- KNETSCH, T. (2006). *Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen*. Berichte aus der Verfahrenstechnik. Aachen: Shaker. URL: <http://diglib.uni-magdeburg.de/Dissertationen/2004/thoknetsch.pdf> (besucht am 17.02.2017).
- KO, R. K., S. S. LEE und E. W. LEE (2009). „Business process management (BPM) standards: a survey“. In: *Business Process Management Journal* 15.5, S. 744–791. DOI: 10.1108/14637150910987937.
- KOLLER, R. (1998). *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte : mit Beispielen*. 4. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer.
- KOLLER, R. (1985). *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen des methodischen Konstruierens*. 2. Aufl. Berlin: Springer.

- 
- KORTLER, S. (2014). *Absicherung von Eigenschaften komplexer und variantenreicher Produkte in der Produktentwicklung*. München: Dr. Hut.
- KREYE, M. E., M. G. YEE und L. NEWNES (2011). „Manifestation of Uncertainty - a Classification“. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design*. Hrsg. von S. J. CULLEY, T. C. MCALOONE, T. J. HOWARD und P. J. CLARKSON. Bd. 6. The Design Society, S. 96–107.
- LEHMANN, T. (1959). „Die Grundlagen der Ähnlichkeitsmechanik und Beispiele für ihre Anwendung beim Entwerfen von Werkzeugmaschinen der mechanischen Umformtechnik“. In: *Konstruktion im Maschinen- Apparate- und Gerätebau* 11.12, S. 465–473.
- LEIMANN, O. (1982). *Wärmeentstehung und Wärmeabfuhr bei Getrieben: Wärmetechn. Auslegung von Getrieben, Getriebeverlustleistung, Getriebekühlung*. 1. Aufl. Iserlohn: Pektun.
- LEONHARD, M. (1984). „Experimentelle Bestimmung der statischen und dynamischen Kennlinien von Gleitlagern bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten“. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- LINDEMANN, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3. korrigierte Aufl. Berlin: Springer.
- LINDEMANN, U., M. MAURER und T. BRAUN (2009). *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*. Berlin: Springer.
- LOTZ, J. und H. KLOBERDANZ (2014). „Scaling Under Dynamic Uncertainty using Laws of Growth“. In: *First International Symposium on Robust Design Proceedings*. Hrsg. von T. J. HOWARD und T. EIFLER. Copenhagen, Denmark, S. 17–27. DOI: 10.4122/dtu:2083.
- LOTZ, J., T. FREUND, K. RATH und H. KLOBERDANZ (2014). „Estimating uncertainty of scaled products using similarity relations and law of growth“. In: *Proceedings of the DESIGN 2014*. Hrsg. von D. MARJANOVIC, M. STORGA, N. PAVKOVIC und N. BOJCETIC. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, The Design Society, Glasgow, S. 273–282.
- LOTZ, J., T. FREUND, J. WÜRTENBERGER und H. KLOBERDANZ (2015). „Principles to Develop Size Ranges of Products with Ergonomic Requirements, Using a Robust Design Approach“. In: *Procedia Manufacturing* 3, S. 6305–6312. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.944.
- (2016). „Uncertainty in Size Range Development - an Analysis of Potential for a new Scaling Approach“. In: *Proceedings of the DESIGN 2016*. Hrsg. von D. MARJANOVIC, M. STORGA, N. PAVKOVIC, N. BOJCETIC und S. SKEC. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, The Design Society, Glasgow, S. 341–350.
- MACH, E. (1917). „Die Aehnlichkeit und die Analogie als Leitmotiv der Forschung.“ In: *Annalen der Natur- und Kulturphilosophie* 14, S. 5–14.
- MADAN, I. (2006). *Ermittlung der Lebensdauer feststoffgeschmierter Wälzkontakte durch Prognose des Wälzverschleißes*. Bd. 387. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.



- 
- MALAKOV, I., V. ZAHARINOV und V. TZENOV (2015). „Size Ranges Optimization“. In: *Procedia Engineering* 100, S. 791–800. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.433.
- MATHIAS, J. (2016). *Auf dem Weg zu robusten Lösungen: Modelle und Methoden zur Beherrschung von Unsicherheit in den frühen Phasen der Produktentwicklung*. Bd. 435. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- MATHIAS, J., H. KLOBERDANZ, R. ENGELHARDT und H. BIRKHOFFER (2010). „Strategies and principles to design robust products“. In: *Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*. Hrsg. von D. MARJANOVIC, M. STORGA, N. PAVKOVIC und N. BOJCETIC. Dubrovnik: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, The Design Society, Glasgow.
- MATTHIASSEN, B. (1997). „Design for Robustness and Reliability: Improving the Quality Consciousness in Engineering Design“. Dissertation. Lyngby: Technical University of Denmark.
- MCRROBERT, S. (1998). *Beyond Brawn: the insider's encyclopedia on how to build muscle and might*. Nicosia: CS Publishing.
- MEYER, B. (2012). *Accuracy in Additive Manufacturing: A common mistake is to confuse high resolution with accuracy*. Hrsg. von LESLIE GORDON. URL: <http://machinedesign.com/3d-printing/accuracy-additive-manufacturing> (besucht am 03.04.2017).
- MILLER, G. A., E. GALANTER und K. H. PRIBRAM (1960). *Plans and the Structure of Behavior*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- MØRKEBERG TORRY-SMITH, J., N. H. MORTENSEN und S. ACHICHE (2014). „A proposal for classification of product related dependencies in development of mechatronic products“. In: *Research in Engineering Design* 25.1, S. 53–74. DOI: 10.1007/s00163-013-0161-5.
- MOST, E. (1989). *Mathematische Verfahren und Hilfsmittel bei der Anwendung von Kostenwachstumsgesetzen für ähnliche Konstruktionen*. Bd. 177. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- OBERKAMPF, W. L., S. M. DELAND, B. M. RUTHERFORD, K. V. DIEGERT und K. F. ALVIN (2002). „Error and uncertainty in modeling and simulation“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 75.3, S. 333–357. DOI: 10.1016/S0951-8320(01)00120-X.
- PAGE, B. und W. KREUTZER (2005). *The Java Simulation Handbook: Simulating Discrete Event Systems with UML and Java*. Berichte aus der Informatik. Aachen: Shaker.
- PAHL, G. und W. BEITZ (1974b). „Baureihenentwicklung (Fortsetzung)“. In: *Konstruktion im Maschinen- Apparate- und Gerätebau* 26.3, S. 113–118.
- (1974a). „Baureihenentwicklung“. In: *Konstruktion im Maschinen- Apparate- und Gerätebau* 26.2, S. 71–79.
- PAHL, G. und F. RIEG (1984). *Kostenwachstumsgesetze für Baureihen: Mit zahlr. Anwendungsbeispielen u. Rechnerprogrammen für d. Konstruktionspraxis*. München und Wien: Hanser.
- PAHL, G., W. BEITZ, J. FELDHUSEN und K.-H. GROTE (2007). *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-34061-4.

- 
- PAHL, G., W. BEITZ, J. FELDHUSEN, K.-H. GROTE, J. HEUSEL, T. BRONNHUBER, W. HUFENBACH, O. HELMS, C. SCHLICK, F. KLOCKE, K. DILGER und R. MÜLLER (2013). „Gestaltungsrichtlinien“. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Hrsg. von J. FELDHUSEN und K.-H. GROTE. Berlin: Springer Vieweg, S. 583–752.
- PARMENTER, D. (2015). *Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs*. 3. Aufl. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781119019855.
- PAWLOWSKI, J. (1971). *Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung: Grundlagen und Anwendung*. Berlin: Springer.
- PELZ, P. F. und A. VERGÉ (2014). „Validated Biomechanical Model for Efficiency and Speed of Rowing“. In: *Journal of Biomechanics* 47, S. 3415–3422. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.06.037.
- PELZ, P. und P. GROCHE, Hrsg. (2015). *Uncertainty in Mechanical Engineering II*. Bd. 807. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.807.
- PIMMLER, T. U. und S. D. EPPINGER, Hrsg. (1994). *Integration Analysis of Product Decompositions*. Minneapolis.
- RADHAKRISHNAN, R. und D. A. MCADAMS (2005). „A Methodology for Model Selection in Engineering Design“. In: *Journal of Mechanical Design* 127.3, S. 378–387. DOI: 10.1115/1.1830048.
- REULEAUX, F. (1875). *Kinematik: Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens*. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn. URL: <https://archive.org/details/theoretischekin01reulgoog> (besucht am 26.06.2017).
- RICHTER, T., D. INKERMANN und T. VIETOR (2016). „Product Architecture Design as a Key Task Within Conceptual Design“. In: *Proceedings of the DESIGN 2016*. Hrsg. von D. MARJANOVIC, M. STORGA, N. PAVKOVIC, N. BOJCETIC und S. SKEC. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, The Design Society, Glasgow.
- RIEG, F. und R. STEINHILPER (2012). *Handbuch Konstruktion*. München: Carl Hanser.
- RIEPE, B. (2003). *Integrierte Produktstrukturmodellierung in den frühen Phasen der Produktentstehung: Eine Methode zur Modularisierung variantenreicher mechatronischer Produkte*. Norderstedt: Books on Demand.
- ROTH, K. (2000). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band I: Konstruktionslehre*. 3. Aufl. Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-17466-7.
- ROYCE, W. W. (1970). „Managing the Development of Large Software Systems“. In: *Technical Papers of Western Electronic Show and Convention*. Hrsg. von THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, S. 328–338.
- RUDOLPH, S. (2002). „Übertragung von Ähnlichkeitsbegriffen: Vorgelegt von Stephan Rudolph“. Habilitationsschrift. Stuttgart: Universität Stuttgart.
- SKF (2014). *Wälzlager*. URL: [http://www.skf.com/binary/78-121486/Walzlager---10000\\_2-DE.pdf](http://www.skf.com/binary/78-121486/Walzlager---10000_2-DE.pdf) (besucht am 09.04.2017).

- 
- SAUER, T. (2006). *Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen*. Bd. 390. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- SCHÄDLER, K. (1999). *Die Ermittlung struktureller Ähnlichkeit und struktureller Merkmale bei komplexen Objekten: Ein konnektionistischer Ansatz und seine Anwendungen*. Bd. 228. DISKI Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz. Berlin: infix, Akademische Verlagsgesellschaft Aka.
- SCHUNKE, A. (1990). *Ähnlichteilsuche für die Rechnerunterstützte Konstruktion: Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen Universität Hannover*. Bd. 22. Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren. Düsseldorf: VDI.
- SCHÜRMAN, H. (2007). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- SEDOV, L. I. (1959). *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*. 4. Aufl. Infosearch: London.
- SIMPSON, T. W., J. R. MAIER und F. MISTREE (2001). „Product platform design: Method and application“. In: *Research in Engineering Design* 13.1, S. 2–22. DOI: 10.1007/s001630100002.
- SPURK, J. H. (1992). *Dimensionsanalyse in der Strömungslehre*. Berlin: Springer.
- SPURK, J. und N. AKSEL (2010). *Strömungslehre: Einführung in die Theorie der Strömungen*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-13143-1.
- STACHOWIAK, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer-Verlag. URL: <https://archive.org/details/Stachowiak1973AllgemeineModelltheorie> (besucht am 25.06.2017).
- STEPHAN, P., K. SCHABER, K. STEPHAN und F. MAYINGER (2013). *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen Band 1: Einstoffsysteme*. 19., ergänzte Aufl. 2013. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg.
- STEWART, D. V. (1981). „The design structure system: A method for managing the design of complex systems“. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* EM-28.3, S. 71–74. DOI: 10.1109/TEM.1981.6448589.
- STICHLMAIR, J. (1990). *Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetze im Ingenieurwesen*. Essen: Altos-Verlag.
- SUH, N. P. (1990). *The Principles of Design*. Oxford Series on Advanced Manufacturing. New York: Oxford University Press.
- (1998). „Axiomatic Design Theory for Systems“. In: *Research in Engineering Design* 10.4, S. 189–209.
- SWADENER, J. G., E. P. GEORGE und G. M. PHARR (2002). „The correlation of the indentation size effect measured with indenters of various shapes“. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 50.4, S. 681–694. DOI: 10.1016/S0022-5096(01)00103-X.
- TAGUCHI, G., S. CHOWDHURY und Y. WU (2005). *TAGUCHI'S Quality Engineering Handbook*. 3. Aufl. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- THELEN, D. (2016). „Getriebe für einen Schleuderprüfstand“. Pat. DE 10 2015 101 885 B4.

- 
- THORNTON, A. C., S. DONNELLY und B. ERTAN (2000). „More than Just Robust Design: Why Product Development Organizations Still Contend with Variaton and its Impact on Quality“. In: *Research in Engineering Design* 12, S. 127–143.
- THUNISSEN, D. P. (2005). „Propagating and Mitigating Uncertainty in the Design of Complex Multidisciplinary Systems“. Diss. Pasadena, California: California Institute of Technology.
- ULLMANN, D. G. (2010). *The Mechanical Design Process*. 4. Aufl. New York: McGraw-Hill.
- UNGER, D. und S. D. EPPINGER (2011). „Improving product development process design: a method for managing information flows, risks, and iterations“. In: *Journal of Engineering Design* 22.10, S. 689–699. DOI: 10.1080/09544828.2010.524886.
- VDI 2204 (1992). *Auslegung von Gleitlagerungen. Berechnung*. Berlin.
- VDI 2221 (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf.
- VDI 2222 (1996). *Konstruktionsmethodik. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Düsseldorf.
- VDI 2223 (2004). *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Düsseldorf.
- VDI-Wärmeatlas (2013). 11., bearb. und erw. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg.
- VERGÉ, A., J. LOTZ, H. KLOBERDANZ und P. F. PELZ (2015). „Uncertainty Scaling - Motivation, Method and Example Application to a Load Carrying Structure“. In: *Applied Mechanics and Materials* 807, S. 99–108. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.807.99.
- VIETOR, T. und C. STECHERT (2013). „Produktarten zur Rationalisierung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses“. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Hrsg. von J. FELDHOUSEN und K.-H. GROTE. Berlin: Springer Vieweg, S. 817–871. DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0.
- VOLLERTSEN, F., D. BIERMANN, H. N. HANSEN, I. S. JAWAHIR und K. KUZMAN (2009). „Size effects in manufacturing of metallic components“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58, S. 566–587. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.002.
- WÄLDELE, M. (2012). *Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte -: Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmenbasierte Produktentwicklung*. Bd. 414. Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI.
- Wälzlagerpraxis: *Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen* (2015). 4. Aufl. Mainz: Vereinigte Fachverlage.
- WEBER, C. (2012). „Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften - eine kritische Zwischenbilanz“. In: *Design for X. Beiträge zum 23. DfX-Symposium Oktober 2012*. Hrsg. von D. KRAUSE, K. PAETZOLD und S. WARTZACK. Hamburg: TuTech, S. 26–62.
- WEBER, M. (1930). „Das allgemeine Ähnlichkeitsprinzip der Physik und sein Zusammenhang mit der Dimensionslehre und der Modellwissenschaft“. In: *Jahrbuch der Schiffsbau-technischen Gesellschaft* 31, S. 274–354.

- 
- WIEBEL, M., A. BOHN und H. BIRKHOFFER (2011). „Uncertainty Modeling in Technical Systems Based on Possibility Theory“. In: *Proceedings of the 2011 IASDR Conference*.
- WIEBEL, M., T. EIFLER, J. MATHIAS, H. KLOBERDANZ, A. BOHN und H. BIRKHOFFER (2013). „Modellierung von Unsicherheit in der Produktentwicklung: Ein Vergleich zwischen Wahrscheinlichkeitstheorie und Möglichkeitstheorie“. In: *Exploring Uncertainty*. Hrsg. von S. JESCHKE, E.-M. JAKOBS und A. DRÖGE. Wiesbaden: Gabler, S. 245–269.
- WIEDEMANN, J. (2007). *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. 3. Aufl. Berlin: Springer.
- WIESE, S. (2010). *Verformung und Schädigung von Werkstoffen der Aufbau- und Verbindungstechnik: Das Verhalten im Mikrobereich*. Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-05463-1.
- WILCOCK, D. F. und E. R. BOOSER (1957). *Bearing Design and Application*. New York: McGraw-Hill.
- WINTERGERST, E. (2015). „Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie. URL: <http://d-nb.info/1074463684/34> (besucht am 12.12.2016).
- WITTEL, H., D. MUHS, D. JANNASCH und J. VOSSIECK (2015). *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch*. 22., vollst. überarb. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- WÖGERBAUER, H. (1943). *Die Technik des Konstruierens*. 2. Aufl. München: Oldenbourg.
- WU, J. und H. LI (2006). „Concepts of Scale and Scaling“. In: *Scaling and Uncertainty Analysis*. Hrsg. von J. WU, B. JONES, H. LI und O. L. LOUCKS. Dordrecht: Springer, S. 3–15.
- ZOHURI, B. (2015). *Dimensional Analysis and Self-Similarity Methods for Engineers and Scientists*. Cham: Springer International Publishing.

---

## Lebenslauf

---

### Persönliche Daten

Name	Julian Lotz
Geburtsdatum	22. Februar 1988
Geburtsort	Limburg a.d. Lahn
Nationalität	Deutsch

### Ausbildung und berufliche Tätigkeit

06/2007	Abitur, Tilemannschule, Limburg a.d. Lahn
10/2007-08/2013	Studium an der Technischen Universität Darmstadt, Studiengang Mechanical and Process Engineering, Abschluss M.Sc.
05/2006-11/2008	Selbstständigkeit, Entwickeln und Fertigen von Sportgeräten aus Faser-Kunststoff-Verbunden
11/2008–12/2018	Geschäftsführender Gesellschafter der Lotz Carbon GmbH, Beratung und Ing.-Dienstleistungen bei der Entwicklung von Faserverbundbauteilen
09/2013-04/2018	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente pmd  Mitglied des interdisziplinären Sonderforschungsbereiches SFB 805 Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus
11/2017 - heute	Director Modular Systems, Voith Turbo GmbH
11/2017	Promotionsprüfung zum Doktoringenieur an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau. Gesamturteil: sehr gut bestanden.